



Kirsi Savolainen

## **Lähes nollaenergiatasoisen toimistorakennuksen vaipparakenteiden rakennusfysikaalinen toimivuus**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 19.2.2018

Valvoja: Professori Xiaoshu Lu-Tervola

Ohjaaja: DI Albert Andersson

---

**Tekijä** Kirsi Savolainen

---

**Työn nimi** Lähes nollaenergiatasoisen toimistorakennuksen vaipparakenteiden rakennusfysikaalinen toimivuus

---

**Koulutusohjelma** Building Technology

---

**Työn valvoja** Xiaoshu Lu-Tervola

---

**Työn ohjaaja** Albert Andersson

---

**Päivämäärä** 19.2.2018

**Sivumäärä** 106 + 16

**Kieli** suomi

---

Rakennuksen vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toimivuus on erittäin tärkeässä roolissa rakennusten kosteusvaurioiden ennaltaehkäisyssä. Rakentamismääräysten muutos vuoden 2018 alussa ja sen myötä kiristyvät energiatehokkuusvaatimukset ovat johtaneet tilanteeseen, jossa on tarpeellista ymmärtää rakennuksen ulkovaipan lämmöneristävyyden suhde sen kosteustekniseen toimintaan. Koska eri rakenteet toimivat toisistaan poikkeavilla tavoilla, tulee kutakin rakennetta tarkastella erikseen eikä yleispätevää suositusta ole mahdollista antaa.

Tämän diplomityön päätavoite oli saada tietoa eräiden nykyisten suunnitteluratkaisujen kosteusteknisestä toimivuudesta siirryttäessä lähes nollaenergiarakentamiseen. Lähestymistapana oli tapaustutkimus, ja tutkitut rakennetyypit eli betonisandwich-ulkoseinä, kevytsorakatto ja maanvastainen alapohja valittiin esimerkkirakennuksen mukaisesti. Tutkimusmenetelmänä käytettiin kirjallisuuskatsausta ja ajasta riippuvaa laskentaa. Käytetty laskentamenetelmä perustuu pääosin eurooppalaiseen standardiin EN 15026.

Työn toisena tavoitteena oli saada kokemusta COMSOL Multiphysics -ohjelman käytöstä rakennusfysiikan laskennassa. Kyseinen ohjelma mahdollistaa kolmiulotteisen tarkastelun sekä ilmavirtauksen sisällyttämisen laskentamalliin.

Laskennan tulosten perusteella betonisandwich-ulkoseinän uloimmat osat saavuttavat talvisin kondenssirajan. Kevytsorakatto pysyy tulosten perusteella tuuletuksen ansiosta alle 80 %:n suhteellisessa kosteudessa, mutta tuuletus lisää lämpöhäviötä rakenteen läpi eristysistä pelkällä kevytsoralla eristetyssä rakenteessa. Maanvastainen alapohja edellyttää tarkkuutta toteutuksessa, sillä rakenteen toiminnan edellytyksenä on sen ilmatiiviyden ja betonin riittävä kuivuminen ennen lattiapäällysteen asentamista.

COMSOL Multiphysics -ohjelman kaltaiset multifysiikkaohjelmat tarjoavat uusia kiinnostavia mahdollisuuksia parantaa rakennusfysiikan laskennan tarkkuutta, suorittaa kolmiulotteista laskentaa ja yhdistää lämmön- ja kosteudensiirtoon muita fysikaalisia ilmiöitä. COMSOL Multiphysics -ohjelman Heat and Moisture -multifysiikkamoduulin ensimmäisten käyttökokemusten perusteella pitkät laskenta-ajat vaikeuttavat laskentaa. Lisäksi rakennusfysiikkaan soveltuviin sisänrakennettujen ominaisuuksien puuttuminen tekee laskentamallin luomisesta työläämpää.

---

**Avainsanat** rakennusfysiikka, lämmön- ja kosteudensiirto, tuuletettu rakenne, lähes nollaenergiarakennus, betonisandwich-ulkoseinä, kevytsorakatto, maanvastainen alapohja, COMSOL Multiphysics

---



---

**Author** Kirsi Savolainen

---

**Title of thesis** Hygrothermal performance of the envelope structures of a nearly zero energy office building

---

**Degree programme** Building Technology

---

**Thesis supervisor** Xiaoshu Lu-Tervola

---

**Thesis advisor** Albert Andersson

---

**Date** 19.2.2018

**Number of pages** 106 + 16

**Language** Finnish

---

Hygrothermal performance of building envelope structures plays a major role in preventing moisture damage in buildings. Due to the change of the Finnish building code in the beginning of 2018 and the stricter requirements for energy efficiency, it is essential to understand the relation of the envelope structure's thermal insulation thickness and the moisture performance. As different structures behave in distinct ways, each structure must be analysed separately and it is not possible to give general recommendations.

The main objective of this master's thesis was to obtain information about the hygrothermal performance of certain design solutions with the nearly zero energy building requirements set as goals. The applied approach was case study. The construction types to be analysed, namely concrete sandwich wall, lightweight aggregate insulated roof and slab on ground floor, were chosen based on the example office building. The research methods were literature review and time dependent simulations. The calculation method was mainly based on the European standard EN 15026.

Another objective of the thesis was to gain experience about the range of application of COMSOL Multiphysics software for building physics calculations. The software enables three-dimensional analysis as well as air flow simulations in the calculation model.

According to the results of the calculations, the outer parts of the concrete sandwich wall have condensation problems during the winters. The lightweight aggregate insulated roof remains at relative humidity below 80 % due to the ventilation. However, the ventilation increases the heat loss through the roof especially in the construction type that uses only lightweight aggregate as insulation material. The slab on ground floor requires careful execution, since air-tightness of the construction and sufficient drying of the concrete before installing the floor covering must be guaranteed.

Multiphysics calculation software like COMSOL Multiphysics provides many interesting possibilities to improve the accuracy of hygrothermal simulations. Using three space dimensions and including air flow or other physical phenomena are some of the advantages. The first gained experience about the Heat and Moisture multiphysics module of COMSOL Multiphysics showed that the long calculation duration complicated the calculations. In addition to that, the lack of building physics related in-built properties makes creating the calculation model more laborious.

---

**Keywords** building physics, hygrothermal performance, air cavity ventilation, nearly zero energy building, concrete sandwich wall, lightweight aggregate insulated roof, slab-on-ground floor, COMSOL Multiphysics

---

## Alkusanat

Aloite tähän diplomityöhön saatiin Sweco Rakennetekniikka Oy:ltä. Rakennusfysiikan laskentamenetelmien kehittäminen, erityisesti kolmiulotteinen laskenta ja ilmapvirtausten sisällyttäminen laskentamalleihin nähdään Sweco Rakennetekniikka Oy:ssä uusia mahdollisuuksia tarjoavana kehityssuuntana.

Työn aihe tarkentui yhteistyössä Työeläkeyhtiö Elon kanssa, jonka rakennuttama toimistorakennus toimi työn esimerkkikohteena. Työssä käytetyt rakennetyypit valikoituivat Työeläkeyhtiö Elon toiveiden mukaan.

Haluaisin kiittää työn rahoittajia Sweco Rakennetekniikka Oy:tä ja Työeläkeyhtiö Eloa. Työ toteutettiin stipendirahoitteisena Aalto-yliopiston tekniikan tukisäätiön stipendillä.

Suuri kiitos kuuluu työn ohjaajalle Albert Anderssonille, joka auttoi työn sisällön rajaamisessa ja neuvoi rakennusfysiikan laskennassa aikaa ja vaivaa säästämättä. Kiitos työn valvojalle Xiaoshu Lu-Tervolalle, jonka osaamista hyödynsin joissakin teoriakysymyksissä. Kiitos myös Timo Karviselle, joka vastasi COMSOL Multiphysics -ohjelman Heat and Moisture -fysiikkamoduulia koskeviin kysymyksiini. Kiitän Tieteen ja tietotekniikan keskus CSC:tä laskentaresurssien tarjoamisesta. Lisäksi kiitän vielä Sweco Rakennetekniikka Oy:tä työskentelypaikan ja työvälineiden tarjoamisesta.

Lopuksi haluan vielä kiittää vanhempiani opintojen pariin kannustamisesta ja onnitella yllpeää isääni, jonka pitkäaikainen haave toteutuu, kun sekä minä että veljeni valmistumme rakennustekniikan diplomi-insinööreiksi. Kiitokset myös työn valmistumisen vaiheita sivusta seuranneille työkavereille ja poikaystävälleni.

Espoo 19.2.2018



Kirsi Savolainen

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo .....	5
Merkinnät.....	7
Lyhenteet .....	10
<b>1 Johdanto.....</b>	<b>11</b>
<b>2 Vaatimuksena lähes nollaenergiarakennus .....</b>	<b>13</b>
2.1 U-arvovaatimusten kehittyminen Suomessa .....	13
2.2 Vuonna 2017 voimassa olevat rakentamismääräykset (D3/2012).....	13
2.3 Direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta (2010/31/EU).....	14
2.4 FInZEB-hanke .....	15
2.5 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta .....	16
<b>3 Lämpö ja kosteus rakenteissa.....</b>	<b>19</b>
3.1 Kosteus rakenteissa .....	19
3.1.1 Kosteuslähteet .....	19
3.1.2 Veden olomuodot ja kosteus ilmassa .....	20
3.1.3 Vaatimukset rakenteiden kosteustekniselle toiminnalle.....	22
3.2 Lämmönsiirron ilmiöt .....	25
3.2.1 Energiansäilymislaki .....	25
3.2.2 Lämmönsiirto.....	25
3.2.3 Latentti lämpö .....	27
3.2.4 Lämmön varastoituminen .....	28
3.3 Kosteudensiirron ilmiöt.....	30
3.3.1 Massan säilymislaki .....	30
3.3.2 Kosteuden varastoituminen rakenteisiin .....	31
3.3.3 Kosteudensiirtomekanismit .....	33
3.4 Lämpötila- ja kosteusjakauman ratkaiseminen.....	37
3.4.1 Lämmön- ja kosteudensiirron kytkeytyminen toisiinsa .....	37
3.4.2 Lämmön- ja kosteudensiirron osittaisdifferentiaaliyhtälöt.....	37
3.4.3 Lämmön- ja kosteudensiirron reunaehdot.....	40
<b>4 Kirjallisuuskatsaus rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta .....</b>	<b>42</b>
4.1 Eristepaksuuden vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen.....	42
4.2 Betonisandwich-ulkoseinä.....	44
4.3 Kevytsorakatto.....	47
4.4 Maanvastainen alapohja .....	53
<b>5 Laskentamallit .....</b>	<b>57</b>
5.1 Malleille yhteisiä määrittelyjä .....	57
5.1.1 Ulko- ja sisäilman olosuhteet.....	57
5.1.2 Materiaaliominaisuudet .....	57
5.1.3 Laskentaohjelmat ja laskennan asetukset .....	57

5.2	Betonisandwich-ulkoseinä.....	58
5.2.1	Mallinnettavien ilmiöiden ja tilaulottuvuuden valinta .....	58
5.2.2	Geometria .....	58
5.2.3	Ilmavirtauksen mallintaminen .....	59
5.2.4	Lämmön- ja kosteudensiirron mallintaminen .....	60
5.2.5	Verkotus .....	62
5.2.6	Parametrien arvot .....	63
5.3	Kevytsorakatto.....	63
5.3.1	Mallinnettavien ilmiöiden ja tilaulottuvuuden valinta .....	63
5.3.2	Geometria .....	64
5.3.3	Ilmavirtauksen mallintaminen .....	65
5.3.4	Lämmön- ja kosteudensiirron mallintaminen .....	65
5.3.5	Verkotus .....	66
5.3.6	Parametrien arvot .....	67
5.4	Maanvastainen alapohja .....	67
5.4.1	Mallinnettavien ilmiöiden ja tilaulottuvuuden valinta .....	67
5.4.2	Geometria .....	68
5.4.3	Lämmön- ja kosteudensiirron mallintaminen .....	68
5.4.4	Verkotus .....	69
5.4.5	Parametrien arvot .....	69
<b>6</b>	<b>Tutkimustulokset .....</b>	<b>70</b>
6.1	Betonisandwich-ulkoseinä.....	70
6.2	Kevytsorakatto.....	76
6.2.1	Kevytsorakatto ilman lisäeristettä.....	76
6.2.2	Mineraalivillalla lisäeristetty kevytsorakatto.....	80
6.2.3	EPS:llä lisäeristetty kevytsorakatto.....	84
6.3	Maanvastainen alapohja .....	88
6.4	Luotettavuusanalyysi .....	90
<b>7</b>	<b>Johtopäätökset .....</b>	<b>93</b>
7.1	Rakentamismääräysten muutos 1.1.2018.....	93
7.2	Tutkittujen rakenteiden kosteustekninen toimivuus .....	93
7.2.1	Betonisandwich-ulkoseinä.....	93
7.2.2	Kevytsorakatto .....	94
7.2.3	Maanvastainen alapohja .....	95
7.3	Johtopäätöksiä tuuletetuista rakenteista .....	96
7.4	Käytetyn laskentamenetelmän soveltuvuus rakennusfysiikan laskentaan .....	98
7.5	Työn merkitys.....	99
7.6	Jatkotutkimustarve .....	100
	Lähdeluettelo.....	101
	Liiteluettelo .....	106
	Liitteet	

## Merkinnät

### Isot kirjaimet

.	[m <sup>2</sup> ]	poikkipinta-ala
$A_{tv}$	[m <sup>2</sup> ]	tuuletusvälin poikkipinta-ala
$A_{ura}$	[m <sup>2</sup> ]	tuuletusuran poikkipinta-ala
$ACH$	[1/h]	ilmanvaihtuvuus
$D_l$	[kg/(m s Pa)]	kapillaarinen kosteudenjohtavuus
$D_\phi$	[kg/(m s)]	kapillaarinen kosteudenjohtavuus
$E_{sol}$	[W/m <sup>2</sup> ]	pinnalle tuleva auringon säteily
$F_D$	[-]	sadeveden valumista kuvaava kerroin
$F_E$	[-]	sateelle altistumista kuvaava kerroin
$F_L$	[kg s/(m <sup>3</sup> mm)]	empiirinen vakio
$G_i$	[kg/(m <sup>3</sup> s)]	jään lähde tai nielu
$G_l$	[kg/(m <sup>3</sup> s)]	nestemäisen veden lähde tai nielu
$G_v$	[kg/(m <sup>3</sup> s)]	vesihöyryn lähde tai nielu
$H$	[J/m <sup>3</sup> ]	kokonaisentalpia
$H_L$	[m]	korkeus
$H_m$	[J/m <sup>3</sup> ]	kuivan materiaalin entalpia
$H_{ura}$	[J/kg]	ilman entalpia tuuletusuran poistoaukossa
$H_w$	[J/m <sup>3</sup> ]	veden entalpia
$H_{out}$	[J/kg]	ulkoilman entalpia
$K$	[m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> s Pa)]	ilmanläpäisevyys
$L$	[m]	tuuletuspituus eli tulo- ja poistoaukon etäisyys
$M_v$	[kg/mol]	vesihöyryn moolimassa
$P_c$	[Pa/m]	kapillaarinen alipaine
$P_\infty$	[Pa]	ilmanpaine
$R_{betoni}$	[(m <sup>2</sup> K)/W]	betonikuorten lämmönvastus
$R_E$	[(m <sup>2</sup> K)/W]	tuuletusuran ulkopuolisten kerrosten lämmönvastus
$R_{se}$	[(m <sup>2</sup> K)/W]	ulkopuolinen pintavastus
$R_{si}$	[(m <sup>2</sup> K)/W]	sisäpuolinen pintavastus
$R_T$	[(m <sup>2</sup> K)/W]	kokonaislämmönvastus
$Q$	[m <sup>3</sup> /s]	tilavuusvirta
$S_h$	[W/m <sup>3</sup> ]	lämmönlähde tai lämpönielu
$S_w$	[kg/(m <sup>3</sup> s)]	kosteuslähde tai -nielu
$T$	[K]	lämpötila
$T_{eq}$	[K]	ekvivalenttinen lämpötila
$T_{in}$	[K]	sisäilman lämpötila
$T_{out}$	[K]	ulkoilman lämpötila
$T_s$	[K]	pinnan lämpötila
$T_{surr}$	[K]	ympäröivien pintojen lämpötila
$T_{ura}$	[K]	tuuletusuran lämpötila
$T_\infty$	[K]	ilman lämpötila riittävällä etäisyydellä pinnasta
$U$	[m/s]	tuulen nopeus
$V$	[m <sup>3</sup> ]	tilavuus

## Pienet kirjaimet

$c_p$	[J/(kg K)]	ominaislämpökapasiteetti
$c_{p,a}$	[J/(kg K)]	ilman ominaislämpökapasiteetti
$c_{p,m}$	[J/(kg K)]	kuivan materiaalin ominaislämpökapasiteetti
$c_{p,i}$	[J/(kg K)]	jään ominaislämpökapasiteetti
$c_{p,w}$	[J/(kg K)]	veden ominaislämpökapasiteetti
$c_v$	[mol/m <sup>3</sup> ]	vesihöyryn konsentraatio
$c_{v,sat}$	[mol/m <sup>3</sup> ]	vesihöyryn kyllästyskonsentraatio
$d_{b,1}$	[m]	betonisisäkuoren paksuus
$d_{b,2}$	[m]	betoniulkokuoren paksuus
$d_{mv}$	[m]	mineraalivillan paksuus
$d_{ura}$	[m]	tuuletusuran paksuus
$g_{conv}$	[kg/s]	kosteuskonvektiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys
$g_l$	[kg/(m <sup>3</sup> s)]	nestemäisen veden massavirta
$g_v$	[kg/(m <sup>3</sup> s)]	vesihöyryn massavirta
$h$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	lämmönsiirtokerroin
$h_i$	[J/kg]	veden sulamislämpö
$h_c$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	konvektiokerroin
$h_{ce}$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	ulkopinnan konvektiokerroin
$h_r$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	säteilyn lämmönsiirtokerroin
$l_{lv}$	[J/kg]	veden höyrystymislämpö
$\dot{m}$	[kg/s]	ilman massavirta
$p$	[Pa]	paine
$p_v$	[Pa]	vesihöyryn osapaine
$p_{v,in}$	[Pa]	sisäilman vesihöyryn osapaine
$p_{v,s}$	[Pa]	vesihöyryn osapaine pinnalla
$p_{v,sat}$	[Pa]	vesihöyryn kyllästyspaine
$p_{v,out}$	[Pa]	ulkoilman vesihöyryn osapaine
$p_{v,\infty}$	[Pa]	vesihöyryn osapaine riittävällä etäisyydellä pinnasta
$q$	[W/m <sup>2</sup> ]	lämpövuoto
$q_{cond}$	[W/m <sup>2</sup> ]	johtumalla siirtyvä lämpövuoto
$q_{conv}$	[W/m <sup>2</sup> ]	konvektiolla pinnasta ilmaan siirtyvä lämpövuoto
$q_{flow}$	[W/m <sup>3</sup> ]	virtaavan fluidin siirtämä lämpömäärä
$q_{lat}$	[W/m <sup>2</sup> ]	latentti lämpövuoto
$q_{rad}$	[W/m <sup>2</sup> ]	säteilyllä siirtyvä lämpövuoto
$q_{rad,max}$	[W/m <sup>2</sup> ]	mustan kappaleen emittoima lämpövuoto
$q_{sens}$	[W/m <sup>2</sup> ]	tuntuvan lämpövuon tiheys pinnalta ympäristöön
$q_{50}$	[m <sup>3</sup> /(h m <sup>2</sup> )]	ilmanvuotoluku
$r_h$	[kg/(m <sup>2</sup> h)]	sademäärä
$r_v$	[kg/(m <sup>2</sup> h)]	seinään kohdistuva viistosateen määrä
$t$	[s]	aika
$t_{bitumi}$	[m]	bitumikerroksen paksuus
$t_{LECA}$	[m]	kevytsorakerroksen paksuus
$t_{tv}$	[m]	tuuletusvälin paksuus
$u$	[m/s]	fluidin virtausnopeus
$u_{tv}$	[m/s]	ilman virtausnopeus tuuletusvälissä
$u_{ura}$	[m/s]	ilman virtausnopeus tuuletusurassa



$w$	[kg/m <sup>3</sup> ]	kosteuspitoisuus
$w_i$	[kg/m <sup>3</sup> ]	jään pitoisuus materiaalissa
$w_l$	[kg/m <sup>3</sup> ]	materiaalissa olevan nestemäisen veden määrä
$w_v$	[kg/m <sup>3</sup> ]	materiaalissa olevan vesihöyryn määrä
$w_{ura}$	[m]	tuuletusuran leveys
$x$	[kg/kg]	vesihöyryn massa massayksikössä ilmaa
$x_{in}$	[kg/kg]	sisäilman absoluuttinen kosteus
$x_{kosteuslisä}$	[kg/kg]	sisäilman kosteuslisä
$x_{out}$	[kg/kg]	ulkoilman absoluuttinen kosteus
$x_{ura}$	[kg/kg]	ilman absoluuttinen kosteus tuuletusuran poistoaukossa
$x_{vaje}$	[kg/kg]	tuuletusilman kylästysvaje

### Kreikkalaiset kirjaimet

$\alpha$	[-]	absorptiokerroin
$\beta$	[s/m]	diffuusiokerroin
$\beta_{bitumi}$	[s/m]	bitumikermien osuutta kuvaava diffuusiokerroin
$\beta_s$	[s/m]	pinnan diffuusiokerroin
$\delta$	[kg/(m s Pa)]	ilman vesihöyrynläpäisevyys
$\delta_p$	[kg/(m s Pa)]	materiaalin vesihöyrynläpäisevyys
$\varepsilon$	[-]	emissiokerroin
$\varepsilon_p$	[-]	huokoisuus
$\kappa$	[m <sup>2</sup> ]	permeabiliteetti
$\lambda$	[W/(m K)]	lämmönjohtavuus
$\lambda_a$	[W/(m K)]	ilman lämmönjohtavuus
$\lambda_b$	[W/(m K)]	betonin lämmönjohtavuus
$\lambda_{mv}$	[W/(m K)]	mineraalivillan lämmönjohtavuus
$\mu$	[-]	diffuusiovastuskerroin
$\mu_d$	[Pa s]	dynaaminen viskositeetti
$\eta_a$	[Pa s]	ilman dynaaminen viskositeetti
$\varphi$	[%]	suhteellinen kosteus
$\varphi_{in}$	[%]	sisäilman suhteellinen kosteus
$\varphi_{out}$	[%]	ulkoilman suhteellinen kosteus
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	tiheys
$\rho_a$	[kg/m <sup>3</sup> ]	ilman tiheys
$\rho_m$	[kg/m <sup>3</sup> ]	kuivan materiaalin tiheys
$\sigma$	[W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )]	Stefan-Boltzmann-vakio
$\theta$	[°]	tuulen suunnan ja pinnan normaalin välinen kulma
$\theta_{tuuli}$	[°]	tuulen suunta

## Lyhenteet

A	asetus
AP	alapohja
E-luku	rakennuksen energiamuotojen kertoimilla painotettu kokonais-energiankulutus
EPS	paisutettu polystyreeni (engl. expanded polystyrene)
EU	Euroopan unioni
EUR-Lex	tietokanta, joka sisältää EU:n oikeudelliset asiakirjat
CSC	Tieteen tietotekniikan keskus
FInZEB	Suomalaiset lähes nollaenergiarakennukset (engl. Finnish nearly net zero energy buildings)
HHL	homehtumisherkkyysluokka
nZEB	lähes nollaenergiarakennus (engl. nearly zero energy building)
L	laki
RakMK	Suomen rakentamismääräyskokoelma
RH	suhteellinen kosteus (engl. relative humidity)
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
U-arvo	rakennusosan lämmönläpäisykerroin
US	ulkoseinä
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
YK	Yhdistyneet kansakunnat
YP	yläpohja

# 1 Johdanto

Rakennusten kosteus- ja homeongelmat ovat olleet viime vuosina yksi keskustelluimmista aihepiireistä suomalaisessa mediassa. Kosteus- ja homeongelmilla voi olla haitallisia vaikutuksia rakennuksen käyttäjien terveyteen ja rakennusmateriaalien säilymiseen, ja ne aiheuttavat merkittäviä taloudellisia rasituksia kiinteistönomistajille. Kosteusongelmia esiintyy sekä vanhassa rakennuskannassa että uudiskohteissa.

Euroopan unionin ilmastotavoitteiden myötä rakennuksilta edellytetään yhä parempaa energiatehokkuutta. Ilmastolaissa määritellään, että Suomen tavoitteena on vähentää ihmisen toiminnasta aiheutuvien kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjä vuoteen 2050 mennessä 80 % vuoden 1990 tasosta (L 609/2015, §6). Koska rakennusten kokonaisenergiankulutus on noin 40 % Euroopan unionin energiankulutuksesta (EUR-Lex 2015), kohdistuu rakennusalaan huomattavia paineita parantaa energiatehokkuutta.

Edellä mainitut ilmiöt ovat johtaneet tilanteeseen, jossa on tarpeellista ymmärtää rakennuksen ulkovaipan lämmöneristävyyden suhde sen kosteustekniseen toimintaan. Tätä tarkoitusta varten Ympäristöministeriö on pyytänyt lausuntoja Teknologian tutkimuskeskukselta (VTT) ja Tampereen teknilliseltä yliopistolta (TTY). Lausunnoissa esitetyt johtopäätökset ovat jossakin määrin ristiriidassa keskenään, sillä VTT puolsi U-arvojen madaltamista 30 – 40 %:lla vuoden 2007 tasosta (VTT 2008), kun taas TTY toi esille useita kosteustekniseen toimintaan liittyviä riskejä ja suositteli maltillisempaa muutosta (Vinha et al. 2008).

TTY:n kriittinen suhtautuminen vaipparakenteiden U-arvojen madaltamiseen on vaikuttanut siihen, että alan toimijat ovat epävarmoja lämmöneristepaksuuden ja kosteusongelmien yhteydestä. Alaa on vaivannut lisäksi epätietoisuus uusien, 1.1.2018 voimaan astuvien rakentamismääräysten sisällöstä. Euroopan unioni edellyttää uusien rakennusten olevan niin sanottuja lähes nollaenergiarakennuksia (engl. nearly zero energy building, nZEB). Koska Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta (A 1010/2017) julkaistiin vasta 20.12.2017, vallitsi alalla aiheeseen liittyen pitkään epätietoisuutta.

Edellä kuvatussa ilmapiirissä on tarpeellista saada lisää tutkimustietoa rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta siirryttäessä lähes nollaenergiarakentamiseen. Erilaiset rakenteet toimivat toisistaan poikkeavilla tavoilla, joten yleispätevää ohjetta ei ole mahdollista antaa, vaan kutakin rakennetta tulee tarkastella erikseen. Tämä tutkimus pyrkii analysoimaan kosteusteknistä toimintaa joidenkin valikoitujen rakenteiden kohdalla.

Tämän tutkimuksen päätavoite oli saada tietoa eräiden nykyisten suunnitteluratkaisujen kosteusteknisestä toimivuudesta siirryttäessä lähes nollaenergiarakentamiseen. Lähestymistapana käytettiin tapaustutkimusta. Tarkasteltava esimerkkikohde oli seitsemänkerroksinen toimistorakennus, joka oli tutkimuksen alkaessa hankesuunnitteluvaiheessa. Tarkasteltavat rakennetyypit eli betonisandwich-ulkoseinä, kevytsorakatto ja maanvastainen alapohja valikoituivat rakennuttajan toiveiden mukaan. Kyseisiä rakennetyyppejä käytetään laajasti muun muassa toimisto- ja toimitilarakentamisessa sekä asuinkerrostaloissa, joten työn tuloksia voidaan soveltaa myös muissa kohteissa.

Työn päätavoitetta tukemassa oli joitakin osatavoitteita. Ensinnäkin tuli perehtyä lähes nollaenergiarakennuksen käsitteeseen ja vuoden 2018 alussa tapahtuvaan rakentamismääräysten muutokseen. Työssä käsitellään Euroopan unionin direktiiviä rakennusten energiatehokkuudesta, sitä seurannutta FInZEB-hanketta ja tämän pohjalta valmisteltua Ympäristöministeriön asetusta uuden rakennuksen energiatehokkuudesta.

Samalla yhtenä osatavoitteena oli perehtyä COMSOL Multiphysics -multifysiikkalaskenta-ohjelman käyttöön rakennusfysiikan laskennassa. COMSOL Multiphysics -ohjelma mahdollistaa lämmön- ja kosteudensiirron ilmiöiden tarkastelun kolmiulotteisesti. Laskentamalliin voidaan sisällyttää ilmavirtausta, joten tuuletettujen rakenteiden toimintaa päästään tarkastelemaan ohjelmalla tarkemmin kuin käytettäessä esimerkiksi rakennusfysiikan alalla yleisesti käytettyä WUFI® 2D -ohjelmaa, jossa tuuletusta käsitellään yksinkertaistetusti lähdetermin avulla.

Tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuuskatsausta ja laskentaa. Kirjallisuuskatsauksen avulla kartoitettiin aihepiiriä koskevaa aikaisempaa tutkimusta ja kuvattiin työssä käsiteltujen rakenteiden lämmön- ja kosteudensiirron ilmiöitä. Työhön sisällytettiin myös kattava katsaus lämmön- ja kosteudensiirron teoriaan. Laskennassa käytettiin yksi-, kaksi- ja kolmiulotteista ajasta riippuvaa tarkastelua. Käytetty laskentamenetelmä perustuu pääosin eurooppalaiseen standardiin EN 15026 (SFS-EN 15026 2007).

Työn rajaukseen liittyviä päätöksiä tehtiin esimerkkirakennuksen rakenteita silmällä pitäen. Koska esimerkkirakennusta ei ollut tarkoitus toteuttaa matalaenergiarakennuksena, pitäydyttiin eristepaksuuksissa rakentamismääräysten vuoden 2018 mukaisessa tasossa. Myös materiaalivalinnoissa pitäydyttiin ulkoseinän ja alapohjan osalta esimerkkirakennuksen rakennetyyppien materiaaleissa. Kevytsorakatosta tutkittiin kuitenkin kolme eri materiaaliyhdistelmää. Perusteluna tähän oli, että kevytsorakatosta löytyi erittäin vähän julkaistua aiempaa tutkimustietoa, joten useamman vaihtoehtoisen rakennetyypin tarkastelu nähtiin tämän rakenteen kohdalla tärkeäksi. Muilta osin työn tavoiteltu laajuus ja aikataulu rajoittivat mahdollisuutta tutkia saman rakennetyypin useita vaihtoehtoisia materiaaleja ja geometrioita.

## 2 Vaatimuksena lähes nollaenergiarakennus

### 2.1 U-arvovaatimusten kehittyminen Suomessa

Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien määräys- ja vertailutasojen kehitys Suomessa vuosina 1962 – 2010 on esitetty taulukossa 1. Poliittinen tilanne, ennen kaikkea energian saatavuus ja ilmastopolitiikka, ovat olleet pääsyytä vaatimusten kiristämiseen. Kiristyksiä on tehty 1970-luvun öljykriisin yhteydessä sekä 2000-luvulla Euroopan unionin ilmastotavoitteiden myötä. Toisaalta myös rakennusmateriaalien ja tekniikoiden kehitys on vaikuttanut U-arvojen tason madaltumiseen. (Vinha et al. 2013, s. 28; Holopainen et al. 2007, s. 19 – 21.)

*Taulukko 1. U-arvojen ( $W/(m K)$ ) määräys- ja vertailutason kehittyminen Suomessa. (Vinha et al. 2013, s. 28; Holopainen et al. 2007, s. 19 – 21.)*

	1962 <sup>1</sup>	1969 <sup>1</sup>	1976	1978	1985	2003	2007	2010
Ulkoseinä	0,81	0,81	0,40	0,29	0,28	0,25	0,24	0,17
Yläpohja	0,47	0,47	0,35	0,23	0,22	0,16	0,15	0,09
Alapohja	0,47	0,47	0,40	0,40	0,36	0,25	0,24	0,16
Ikkuna	-	3,14 – 2,44 <sup>2</sup>	2,1	2,1	2,1	1,4	1,4	1,0
Ovi	-	3,14 – 2,44 <sup>2</sup>	-	-	-	1,4	1,4	1,0

<sup>1</sup> Normeissa RIY A43 (1962) ja RIL 66 (1969) Suomi jaettiin eteläiseen ja pohjoiseen vyöhykkeeseen ja lisäksi vaatimukset riippuivat rakennusmateriaalista ja siitä, rajoittuiko tila lämpimään vai puoli-lämpimään tilaan vai ulkoilmaan. Annetuissa esimerkkiarvoissa kyseessä on eteläisellä vyöhykkeellä sijaitseva kivirakennus, jonka lattia rajoittuu lämmittämättömään tilaan.

<sup>2</sup> Vaatimus riippuu ikkunan ja oven koosta.

### 2.2 Vuonna 2017 voimassa olevat rakentamismääräykset (D3/2012)

Vuonna 2017 noudatetaan vuonna 2012 voimaan astuneita energiatehokkuusvaatimuksia, jotka on esitetty Rakennusmääräyskokoelman osassa D3 ”Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2012”. Kyseisissä määräyksissä siirryttiin käyttämään E-lukua rakennuksen energiatehokkuutta määrittelevänä tunnuslukuna. E-luvun laskennassa otetaan huomioon rakennuksen laskennallinen ostoenergian kulutus mukaan lukien lämmitys, lämmin käyttövesi, sähkö ja jäähdytys. Uusiutuva omavaraisenergia huomioidaan ostoenergian määrää pienentävänä tekijänä. Kukin energiamuoto kerrotaan kertoimella, joka ottaa huomioon energiatuotannon primäärienergian tarpeen. E-luvun yksikkö on  $kWh_E/(m^2a)$ , kilowattituntia lämmitettyä nettoalaa kohden vuodessa. (RakMK D3 2012.)

E-lukupohjaisessa tarkastelussa rakenneosien U-arvoille annetaan maksimi-arvo, jota ei saa ylittää ( $0,60 \text{ } W/(m^2K)$ ) sekä vertailuarvot, joita suurempia arvoja käytettäessä täytyy lämpöhäviö kompensoida jonkin toisen tekijän avulla. Lämpöhäviöiden tasauslaskennassa käytettävät vertailuarvot on esitetty taulukossa 2. (RakMK D3 2012.)

Vuosien 2010 ja 2012 määräysten taustalla ovat Euroopan unioniin kuuluvien valtioiden päästövähennystavoitteet. Ympäristöministeriö teetti asetusvalmistelun yhteydessä sekä Tampereen teknillisellä yliopistolla (TTY) että Teknologian tutkimuskeskuksella (VTT)

selvityksen lämmöneristävyyden parantamisen aiheuttamista kosteus- ja homeeriskeistä (Vinha et al. 2008; VTT 2008). Näistä TTY suhtautui U-arvojen vertailutason madaltamiseen kriittisemmin ja suositteli 15 – 20 %:n muutosta 30 %:n muutoksen sijaan. Määräysten tasoksi valittiin lopulta TTY:n raportissa annettu ”tiukin mahdollinen kiristys”. (Vapaavuori 2009.) TTY:n ja VTT:n tutkimustuloksia käsitellään tarkemmin luvussa 4.1.

*Taulukko 2. Energialaskennassa käytettäviä määräys- ja vertailuarvoja. (RakMK D3 2012.)*

E-luku (toimistorakennus)	170 kWh <sub>E</sub> /(m <sup>2</sup> a)
U-arvo ulkoseinä	0,17 W/(m <sup>2</sup> K)
U-arvo yläpohja	0,09 W/(m <sup>2</sup> K)
U-arvo maanvastainen alapohja	0,16 W/(m <sup>2</sup> K)
U-arvo ikkuna ja ovi	1,0 W/(m <sup>2</sup> K)
Ilmanvuotoluku q <sub>50</sub>	2 m <sup>3</sup> /(h m <sup>2</sup> )
Poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde	45 %

### **2.3 Direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta (2010/31/EU)**

Euroopan unionin (EU) ilmastopolitiikka perustuu YK:n ilmastopöytäkirjaan. Ilmasto- ja energiapaketin 2020 eli niin sanotun 20:20:20-päätöksen tavoitteina on vähentää kasvihuonepäästöjä vuoteen 2020 mennessä 20 % vuoden 1990 tasoon verrattuna, lisätä uusiutuvan energian osuutta 20 %:iin ja parantaa energiatehokkuutta 20 %. Tästä seuraava tavoite on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 40 % vuoteen 2030 mennessä. (European Commission 2017.) EU:ssa rakennukset aiheuttavat 40 % kokonaisenergiankulutuksesta (EUR-Lex 2015), joten rakennuksiin kohdistuu suuria paineita energiatehokkuuden parantamiselle.

Rakennussektoria koskee vuonna 2010 annettu Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU rakennusten energiatehokkuudesta (Euroopan unioni 2010). Sen mukaan jäsenvaltioiden on varmistettava, että kaikki uudet rakennukset ovat lähes nollaenergiarakennuksia (engl. nearly zero energy building, nZEB) 31.12.2020 mennessä ja viranomaisten käytössä tai omistuksessa olevat rakennukset 31.12.2018 mennessä. Lähes nollaenergiarakennus on määritelty direktiivin 2 artiklassa seuraavasti:

*”Lähes nollaenergiarakennuksella” tarkoitetaan rakennusta, jolla on erittäin korkea energiatehokkuus, sellaisena kuin se on määritettynä liitteen I mukaisesti. Tarvittava lähes olematon tai erittäin vähäinen energian määrä olisi hyvin laajalti katettava uusiutuvista lähteistä peräisin olevalla energialla, mukaan lukien paikan päällä tai rakennuksen lähellä tuotettava uusiutuvista lähteistä peräisin oleva energia. (Euroopan unioni 2010.)*

Jäsenvaltioilta edellytetään kansallista suunnitelmaa, josta käy ilmi, miten jäsenvaltio käytännössä soveltaa lähes nollaenergiarakennuksen määritelmää. Kansallisissa suunnitelmissa voidaan ottaa huomioon alueelliset erityispiirteet, kuten paikallinen ilmasto ja rakennustapa. Suunnitelmiin tulee sisällyttää numeroarvoinen indikaattori primäärienergian käytöstä. Direktiiviin kuuluvassa liitteessä I on määritelty, mitä rakennuksen ominaisuuksia ja näkökohtia energialaskennassa tulee ottaa huomioon. (Euroopan unioni 2010.)

## 2.4 FInZEB-hanke

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin 2010/31/EU edellyttämää kansallista suunnitelmaa valmistelevaan perustettiin FInZEB-hanke (Finnish nearly net zero energy buildings). Hankkeen tavoitteena oli luoda pohja Suomen kansalliselle tulkinnalle siitä, mitä EU-direktiivin vaatimalla lähes nollaenergiarakennuksella ymmärretään. Hankkeessa koottiin yhteen kiinteistö- ja rakennusalan yhteinen näkemys siitä, mitkä ratkaisut ovat teknisesti toimivia ja kustannustehokkaita, lyhyellä aikataululla toteutettavissa mutta silti riittävän haasteellisia. Alan ja teknologian kehittyminen pyrittiin ottamaan huomioon realistisella tavalla. Hankkeen toteuttivat Ympäristöministeriö, Rakennusteollisuus RT ry ja Talotekniikkateollisuus ry. Päävastuullisena konsulttina toimi Granlund Oy. Hankkeen loppuraportti valmistui keväällä 2015 ja sen suosituksia päästiin hyödyntämään 1.1.2018 voimaan astuvien rakennusmääräyksien valmistelussa. (Granlund Oy 2015a, s. 8.)

Monilta osin FInZEB-hankkeen ehdotuksissa mukailtiin nykyisiä määräyksiä, kuitenkin raja-arvoja kiristäen. E-lukuun perustuva rakennusmääräys on koettu onnistuneeksi ja sen käyttöä ehdotettiin jatkettavan. E-luvun ehdotettu muutos vaihtelee rakennustyyppittäin. Toimistorakennuksiin kohdistuu kaikista suurin vähennys: E-luvun tasoksi ehdotettiin 90 kWh<sub>E</sub>/(m<sup>2</sup>a), jolloin vähennys vuoden 2010 tasosta (170 kWh<sub>E</sub>/(m<sup>2</sup>a)) on 47 %. (Granlund Oy 2015a.)

Ehdotukset ottavat lisäksi huomioon energiasektorin ennustetun kehityksen ja uusiutuvan energian kasvavan osuuden. Rakennuksiin kohdistuvia vaatimuksia ovat jatkossa matala sähkön huipputeho ja kysyntäjousto-ohjaukseen soveltuva osuus huipputehosta. Omavaraisuutannon lisääntyessä rakennuksen yhteydessä tuotetun uusiutuvan energian vienti voitaisiin mahdollisesti myös sisällyttää E-lukuun tietyillä kertoimilla painotettuna. Muita hankkeessa ehdotettuja täydentäviä vaatimuksia ovat mm. kesäajan sisälämpötilatarkastelu, RER-luku eli uusiutuvan energian osuus käytetystä energiasta ja ilmanvaihtojärjestelmän sähkötehokkuus. Harkittavaksi jätettiin myös vaihtoehto, että osa vaatimuksista olisi vaihtoehtoisia, eli että rakennuksen tulisi E-lukuvaatimuksen lisäksi täyttää esimerkiksi viisi kymmenestä lisävaatimuksesta. (Granlund Oy 2015a.)

Rakennusosien lämpöhäviön osalta hankkeessa todetaan nykymääräysten tason olevan sopiva. D3/2012 määräysten lämmönläpäisykertoimien vertailuarvojen tasoa matalammilla U-arvoilla on hyvin vähäinen vaikutus energiankulutukseen. Kun nykyarvoja (taulukko 1) verrattiin laskennallisesti passiivirakenteiden U-arvoihin (US 0,14 W/(m<sup>2</sup> K); YP 0,07 W/(m<sup>2</sup> K); AP 0,1 W/(m<sup>2</sup> K)), todettiin että nykymääräysten vertailuarvojen taso U-arvoille on kustannusoptimaalinen eikä vertailuarvoja ole tarvetta tiukentaa. Kuitenkin pientaloissa lämpöhäviö vaipan läpi aiheuttaa niin merkittävän osan energiankulutuksesta, että rakenteiden parantaminen passiivitasoon on huomioon otettava keino E-lukua madallettaessa. Koska hankkeessa ei ehdotettu U-arvojen madaltamista, myöskään uutta rakennusfysikaalista tarkastelua ei tehty. (Granlund Oy 2015b, s. 5.)

FInZEB-hankkeessa määriteltiin seuraavat toimenpiteet kustannustehokkaiksi ja toteutuskelpoisiksi tavoiksi madaltaa E-lukua:

- ilmatiiviyn parantaminen tasoon  $n_{50} = 0,6$  l/h
- energiatehokkaammat ikkunat ( $U = 0,6 - 0,8$  W/(m<sup>2</sup> K))
- kylmäsiltojen vähentäminen 25 prosentilla D5/2012-laskennan mukaisesta arvosta
- ilmanvaihdon lämmön talteenoton hyötysuhteen parantaminen (D3/2010 vertailuarvo 45 %, ehdotettu normaalikäytön mukainen taso 72 %)

- tarveohjattu ilmanvaihto
- ilmanvaihtojärjestelmän sähkötehokkuuden parantaminen
- energiatehokas ja tarveohjattu valaistus
- tulevaisuudessa myös uusiutuvan energian paikallinen tuottaminen.

(Granlund Oy 2015a.)

Energiansäästötoimenpiteet nojaavat siis ennen kaikkea energiatehokkaasta talotekniikasta ja automaatiosta saataviin hyötyihin. Haasteena on kyseisten järjestelmien säätäminen. Pilottikohteiden kokemusten perusteella muun muassa ilmanvaihtojärjestelmien säätäminen ei ole ongelmaton ja sopivia toiminta-arvoja täytyy hakea takuuajan aikana. Lisäksi rakennuksen käyttäjät voivat kokea monimutkaisten järjestelmien käytön vaikeaksi. (Granlund Oy 2015c.)

## 2.5 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta astuu voimaan 1.1.2018. Asetuksessa E-luvun raja-arvot madaltuvat huomattavasti. Taulukossa 3 on annettu esimerkkinä toimistorakennuksen ja asuinkerrostalon vuosien 2012 ja 2018 mukaiset E-luvun raja-arvot. Lisäksi taulukossa on esitetty muita muuttuneita arvoja. (A 1010/2017.)

*Taulukko 3. Energialaskennassa käytettävien arvojen muutoksia. (RakMK D3 2012; A 1010/2017.)*

Tunnusluku	D3/2012	asetus 1.1.2018
E-luku (toimistorakennus)	170 kWh <sub>E</sub> /(m <sup>2</sup> a)	100 kWh <sub>E</sub> /(m <sup>2</sup> a)
E-luku (asuinkerrostalo)	130 kWh <sub>E</sub> /(m <sup>2</sup> a)	90 kWh <sub>E</sub> /(m <sup>2</sup> a)
Poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen vertailuarvo	45 %	55 %
Ilmanvaihdon sähköteho (koneellinen tulo- ja poistoilma)	2,0 kW/(m <sup>3</sup> /s) (ei velvoittava)	1,8 kW/(m <sup>3</sup> /s)
Ilmanvaihdon sähköteho (koneellinen poistoilma)	1,0 kW/(m <sup>3</sup> /s) (ei velvoittava)	0,9 kW/(m <sup>3</sup> /s)
Valaistuksen lämpökuorma	12 W/m <sup>2</sup>	10 W/m <sup>2</sup>

Vuoden 2018 alussa astuu voimaan myös valtioneuvoston asetus rakennuksissa käytettävien energiamuotojen kertoimien lukuarvoista (A 788/2017). Asetuksessa sähkön, kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen energiamuotojen kertoimet pienenevät 29 – 30 % (taulukko 4). Käytännössä kertoimien muuttuminen tarkoittaa, että sähköä, kaukolämpöä ja kaukojäähdytystä käyttävän rakennuksen E-luku pienenee 29 % ilman että suunnitteluratkaisuihin tarvitsee tehdä muutoksia. Näin ollen esimerkiksi asuinkerrostaloja koskeva 31 % matalampi E-luku saavutetaan lähes täysin ilman teknisiä muutoksia. Toimistorakennuksien 41 % matalampi E-luku saavutetaan kertoimien muutoksen ansiosta vähentämällä ostoenergian kulutusta noin 20 %. Fossiilisia tai uusiutuvia polttoaineita energiamuotona käyttävä rakennus ei kuitenkaan saa vastaavaa etua, koska näiden energiamuotojen kertoimet eivät muutu.



*Taulukko 4. E-luvun laskennassa käytettävien energiamuotojen kertoimien arvojen muutos. (A 9/2013; A 788/2017.)*

Energiamuoto	asetus 9/2013	asetus 2017	muutos
sähkö	1,7	1,2	-29 %
kaukolämpö	0,7	0,5	-29 %
kaukojäähdytys	0,4	0,28	-30 %
fossiiliset polttoaineet	1,0	1,0	-
uusiutuvat polttoaineet	0,5	0,5	-

Asetuksessa (A 1010/2017) ei esitetä muutoksia U-arvojen vertailuarvoille, vaan nämä säilyvät vuoden 2010 tasolla (taulukko 1). Eristepaksuuksiin ei siis tullut asetuksen myötä muutosta. Energiankulutusta pienennetään pääasiassa ilmanvaihdon ja rakennusautomaation keinoin.

Edellisestä poikkeuksen muodostavat asuinrakennukset. Asetuksen (A 1010/2017) mukaan pientalojen, rivitalojen ja asuinkerrostalojen energiatehokkuus voidaan osoittaa joko E-luvun tai rakenteellisen energiatehokkuuden avulla. Käytettäessä kriteerinä rakenteellista energiatehokkuutta täytyy rakennuksen täyttää seuraavat vaatimukset:

- Rakennusosien lämmönläpäisykertoimille, ilmanvuotoluvulle ja poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteelle pätevät tiukemmat vertailuarvot.
- Rakennuksessa on oltava koneellinen tulo- ja poistoilmajärjestelmä, jonka ominais-sähköteho on enintään 1,5 kW/(m<sup>3</sup>/s).
- Lämmitysjärjestelmänä on käytettävä kaukolämpöä, maalämpöpumppua tai ilma-vesilämpöpumppua.

Verratessa FInZEB-hankkeen suosituksia ja 1.1.2018 voimaan astuvaa asetusta voidaan todeta, että muutokset ovat suositusten suuntaisia mutta lievempiä. Toimistorakennuksen uusi E-luvun raja-arvo on 100 kWh<sub>E</sub>/(m<sup>2</sup> a) FInZEB-hankkeessa ehdotetun 90 kWh<sub>E</sub>/(m<sup>2</sup> a) sijaan ja ilmanvaihdon lämmöntalteenoton hyötysuhde on 55 % ehdotetun 72 %:n sijaan. Uuteen asetukseen sovellettiin seuraavia FInZEB-hankkeen ehdotuksia:

- Ilmanvaihdon lämmön talteenoton hyötysuhde nousi.
- Ilmanvaihtojärjestelmän sähköteholle annetaan velvoittava maksimiarvo.
- Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla varustetussa tilassa voidaan käyttää pienempää ulkoilmavirtaa.
- Valaistuksen lämpökuormaa pienennettiin arvoon 10 W/m<sup>2</sup>, millä otettiin huomioon LED-lamppujen parantunut energiatehokkuus.
- Sähkön huipputehon tarpeen pienentäminen ja kysyntäjousto-ohjaus kehoitetaan ottamaan huomioon suunnittelussa. (A 1010/2017.)

FInZEB-hankkeen ehdotusta ikkunoiden U-arvon vertailuarvon madaltamisesta ei sovellettu asetukseen. Ikkunan U-arvon vertailuarvo säilyy arvossa 1,0 W/(m<sup>2</sup> K), vaikka markkinoilla on saatavilla tätä energiatehokkaampia ikkunoita. Myöskään rakennuksen yhteydessä tuotetun uusiutuvan energian vienti ei sisälly asetukseen, vaan ainoastaan rakennuksen omaan käyttöön kuukausitasolla tuleva osuus huomioidaan E-luvun laskennassa.

Vaikka Ympäristöministeriön asetuksessa ei edellytetä aiempaa matalampia U-arvoja lukuun ottamatta asuinrakennusten rakenteellisen energiatehokkuuden vaihtoehtoa, on

vertailuarvoja matalampien U-arvojen käyttö yksi mahdollinen keino saavuttaa E-luvun raja-arvo. Muita keinoja ovat esimerkiksi energiankulutuksen huomioiminen arkkitehtisuunnittelussa siten että rakennuksen muoto, sijoittelu ja ikkunoiden koko ja sijoittelu valitaan energiankulutus huomioon ottaen. Lisäksi määräystasoa energiatehokkaamman talotekniikan käyttö ja lämmitysmuodon valinta vaikuttavat osaltaan E-lukuun.

Näin ollen eristepaksuus on yksi monista keinoista matalamman E-luvun saavuttamiseksi, ja suunnittelijoiden ratkaistavaksi jää, halutaanko eristepaksuutta lisätä rakentamismääräysten vertailutasosta. Eristepaksuuden valintaan vaikuttavat ainakin seuraavat seikat:

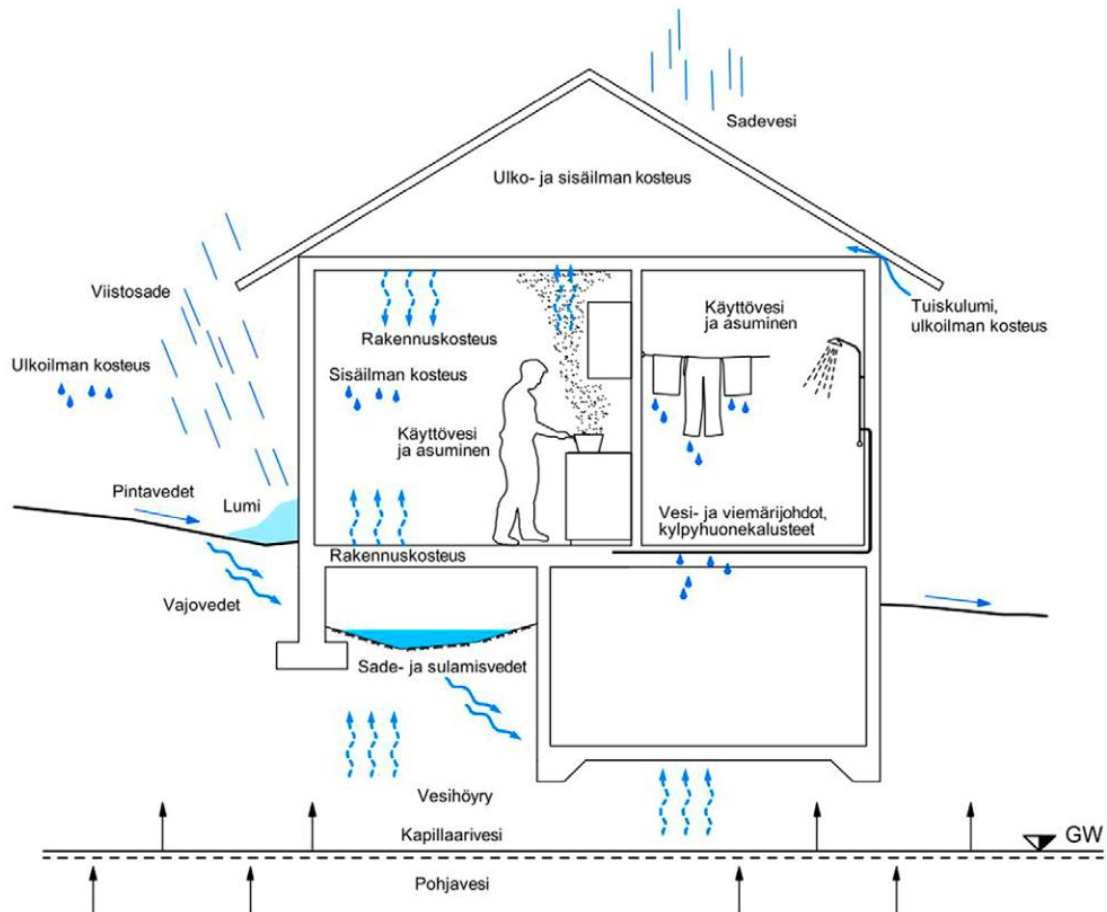
- vertailuarvoja matalampien U-arvojen vähäinen vaikutus rakennuksen kokonais-energiankulutukseen (Granlund Oy 2015b; Ympäristöministeriö 2012)
- lämmöneristävyyden vaikutus elinkaarikustannuksiin (IEA 2008, s. 35 – 38; Lylykangas et al. 2016; Optiplan Oy 2015; Ympäristöministeriö 2012)
- rakennuksen ulkovaipan pitkä käyttöikä, jonka aikana eristepaksuuden muuttaminen on hankalaa ja taloudellisesti kannattamatonta (Lylykangas et al. 2016)
- teknisen toteutettavuuden vaikeutuminen rakenteiden mittojen kasvaessa (Vinha et al. 2008, s. 8 – 9; Lahdensivu et al. 2012, s. 39 – 42 ja 84)
- rakenteiden kosteustekninen toimivuus (Vinha et al. 2008; Vinha et al. 2013; VTT 2008).

## 3 Lämpö ja kosteus rakenteissa

### 3.1 Kosteus rakenteissa

#### 3.1.1 Kosteuslähteet

Rakenteisiin kohdistuva kosteus voi olla vesihöyryä tai nestemäistä vettä ja sen lähde voi olla joko rakennuksen sisä- tai ulkopuolella. Kosteuskuormitus voi olla normaalikäytöstä tai vikatilanteesta johtuvaa. Kuva 1 havainnollistaa kosteuslähteitä.



Kuva 1. Rakennuksen kosteuslähteet. (Pitkäranta 2016, s. 107.)

Ilmaan sitoutunut vesihöyry siirtyy Suomen olosuhteissa vesihöyryn osapaineen eroista johtuen yleensä rakennuksen sisältä ulospäin. Sisäilman kosteuslisä aiheutuu muun muassa ihmisistä, ruuanlaitosta, suihkun käytöstä tai muista toiminnoista. Myös ulkoilman kosteus kuormittaa rakenteita ja voi siirtyä kesäolosuhteissa ulkoa sisäänpäin.

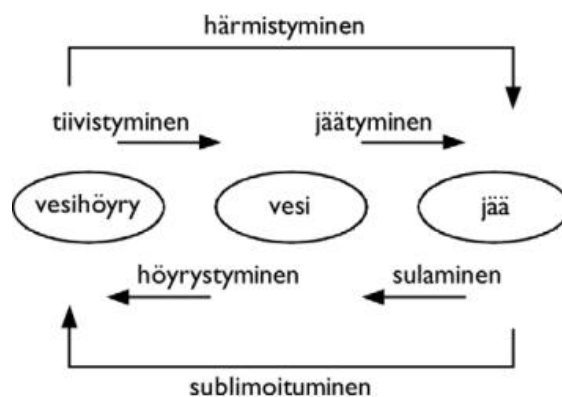
Nestemäisen veden lähde on ennen kaikkea sade, joka voi esiintyä vetenä, lumena tai rakeina. Kosteusrasitus riippuu hallitsevasta tuulensuunnasta ja rakennuksen korkeudesta. Suurin viistosateesta aiheutuva rasitus kohdistuu julkisivun yläosaan. Rasitus on Suomen olosuhteissa suurin syksyllä, jolloin sadejaksoja on paljon ja vuorokautiset lämpötilamuutokset ovat pieniä eivätkä mahdollista nopeaa kuivumista. Rakennus ja sen ympäristö tulee suunnitella niin, että sadevesi ohjautuu pois päin rakennuksesta. (Pitkäranta 2016, s. 106 – 111.)

Virhetilanteena voidaan pitää tilannetta, jossa rakenteeseen pääsee vettä kapillaarisesti tai vuodon seurauksena. Maaperän kapillaarista vettä voi imeytyä rakennuksen perustuksiin ja alapohjaan, jos ilmiötä ei ole estetty kapillaarisen nousun katkaisevalla sorakerroksella ja vedeneristeellä. Vikatilanteessa rakenteeseen saattaa vuotaa putkista tai sadevedestä peräisin olevaa nestemäistä vettä. (Hens 2016, s. 208 – 234; Pitkäranta 2016, s. 106 – 111.)

Käytönaikaisten kosteusrasitusten lisäksi myös rakennusaikana materiaaleihin sitoutunut kosteus vaikuttaa rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. Kosteutta sitoutuu materiaaleihin rakennusvaiheessa ympäröivästä ilmasta tai jos ne ovat sateelle alttiina. Betonin tapauksessa materiaalissa on alussa korkea kosteuspitoisuus johtuen betonin valmistuksessa käytetystä vedestä. (Hens 2016, s. 208 – 234; Pitkäranta 2016, s. 106 – 111.)

### 3.1.2 Veden olomuodot ja kosteus ilmassa

Vesi esiintyy kolmessa olomuodossa: vesihöyrynä, nestemäisenä vetenä ja jäänä (kuva 2). Olomuoto määräytyy lämpötilan, paineen ja ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden perusteella. Veden, ilman ja vesihöyryn muodostama systeemi hakeutuu kohti tasapainotilaa, jossa ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Veden jäätyminen puolestaan riippuu lämpötilasta ja huokoisen materiaalin huokosten koosta. Olomuodon muutoksista sulaminen ja höyrystyminen sitovat ympäristöstä energiaa, ja tiivistyminen eli kondensoituminen ja jäätyminen vapauttavat energiaa. (Pitkäranta 2016, s. 101 – 102.)



Kuva 2. Veden olomuodot ja olomuotojen muutokset. (Pitkäranta 2016, s. 101.)

Ilma sitoo itseensä vesihöyryä. Ilman kyky sitoa vesihöyryä riippuu lämpötilasta siten että lämmin ilma voi sitoa enemmän vesihöyryä kuin kylmä ilma (kuva 3). (Pitkäranta 2016, s. 101 – 103.) Kyllästystilan vesihöyryn osapaineen eli kyllästyspaineen laskemiseen on olemassa useita hieman toisistaan poikkeavia kaavoja (Hens 2012, s. 161 – 164). Tässä työssä käytetään kyllästyspaineen laskemiseen COMSOL Multiphysics -ohjelman käyttämää kaavaa (1) (COMSOL Multiphysics 5.3, s. 232).

$$p_{v,sat}(T) = 610,7 \text{ Pa} \cdot 10^{7,5 \frac{T-273,15 \text{ K}}{T-35,85 \text{ K}}} \quad (1)$$

missä  $p_{v,AAA}$  on vesihöyryn kyllästyspaine annetussa lämpötilassa [Pa]  
 $T$  on lämpötila [K]

Kosteuden määrä ilmassa voidaan ilmoittaa joko absoluuttisen tai suhteellisen kosteuden avulla. Absoluuttisella kosteudella tarkoitetaan vesihöyryn massaa massayksikössä ilmaa, ja se lasketaan kaavalla (2) (Hens 2012, s. 161).

$$x = \frac{0,62 \cdot p_v}{P_\infty - p_v} \quad (2)$$

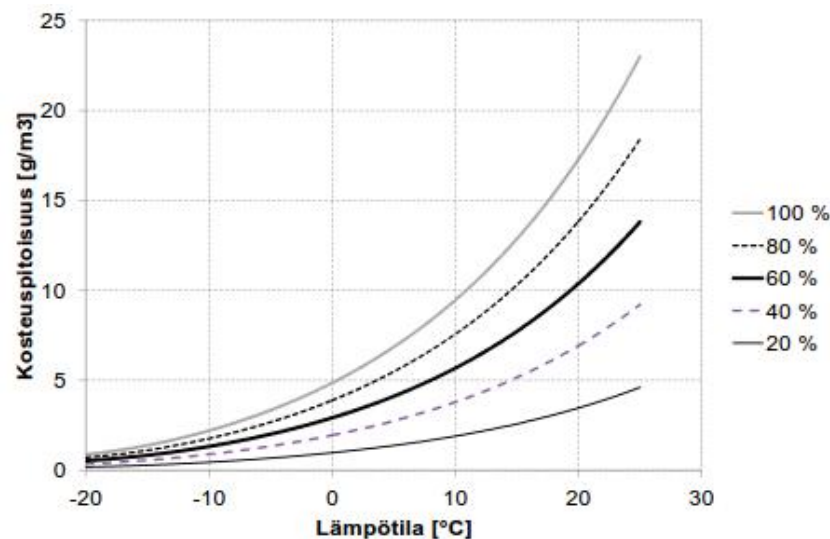
missä  $x$  on vesihöyryn massa massayksikössä ilmaa [kg/kg]  
 $p_v$  on vesihöyryn osapaine [Pa]  
 $P_\infty$  on ilmanpaine [Pa]

Suhteellinen kosteus puolestaan on ilman sisältämän vesihöyryn määrän suhde vesihöyryn määrään kyseistä lämpötilaa vastaavassa kyllästystilassa (Hens 2012, s. 164):

$$\varphi = 100 \cdot \frac{p_v}{p_{v,sat}(T)} \quad (3)$$

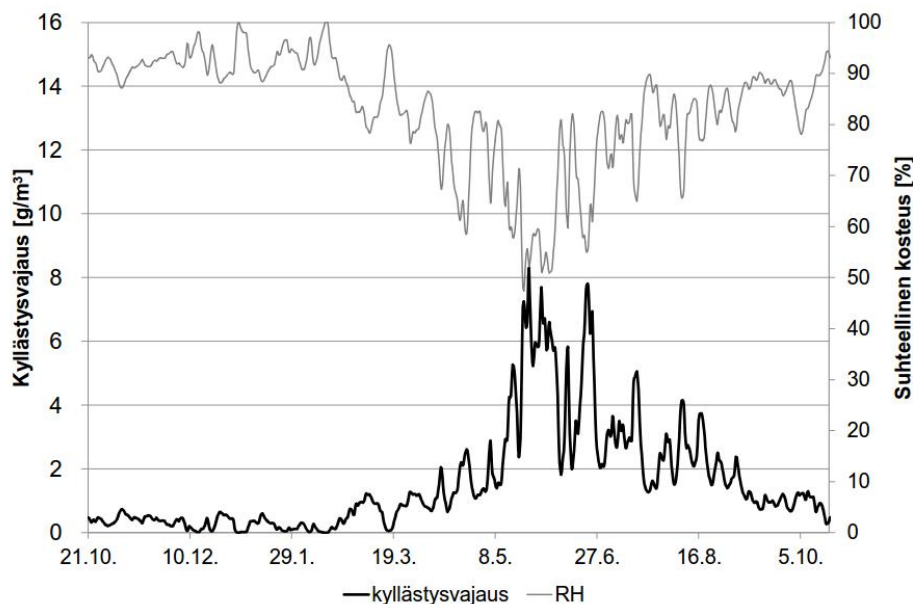
missä  $\varphi$  on suhteellinen kosteus [%]  
 $p_v$  on vesihöyryn osapaine [Pa]  
 $p_{v,sat}$  on vesihöyryn kyllästyspaine tarkasteltavassa lämpötilassa [Pa]

Absoluuttisen ja suhteellisen kosteuden yhteyttä on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. Ilman sisältämän vesihöyryn määrän riippuvuus ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. (Pitkäranta 2016, s. 101.)

Ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus vaikuttavat rakenteiden kastumiseen ja kuivumiseen. Termillä kyllästysvajausta tarkoitetaan kyllästystilan kosteuspitoisuuden ja vallitsevan kosteuspitoisuuden erotusta (Pitkäranta 2016, s. 109). Ulkoilmalla tuuletetuissa rakenteissa tuuletusilma voi sitoa kosteutta rakenteesta kyllästysvajauksensa verran. Kuvasta 4 nähdään, että kyllästysvajausta on talvikuukausina Suomen olosuhteissa lähellä nollaa, ja tuuletus ulkoilmalla voi kuivattaa rakenteita ennen kaikkea toukokuusta elokuuhun. Tuuletusilma voi kuitenkin sitoa ulkoilman kyllästysvajausta suuremman määrän kosteutta, jos sen lämpötila nousee sen virratessa tuuletusvälissä tai -urassa.



Kuva 4. Esimerkki ulkoilman kyllästysvajaauksen ja suhteellisen kosteuden vaihteluista kesällä ja talvella. (Pitkäranta 2016, s. 109.)

Kosteuden tiivistymistä rakenteisiin tapahtuu tilanteissa, joissa rakenteessa olevan ilman suhteellinen kosteus nousee arvoon 100 %. Näin voi käydä esimerkiksi, jos lämmintä ja kosteaa sisäilmaa virtaa rakennuksen sisältä ulos epätiivisiin kohdan läpi. Ilman virratessa rakenteen läpi se jäähtyy, minkä seurauksena sen suhteellinen kosteus nousee.

### 3.1.3 Vaatimukset rakenteiden kosteustekniselle toiminnalle

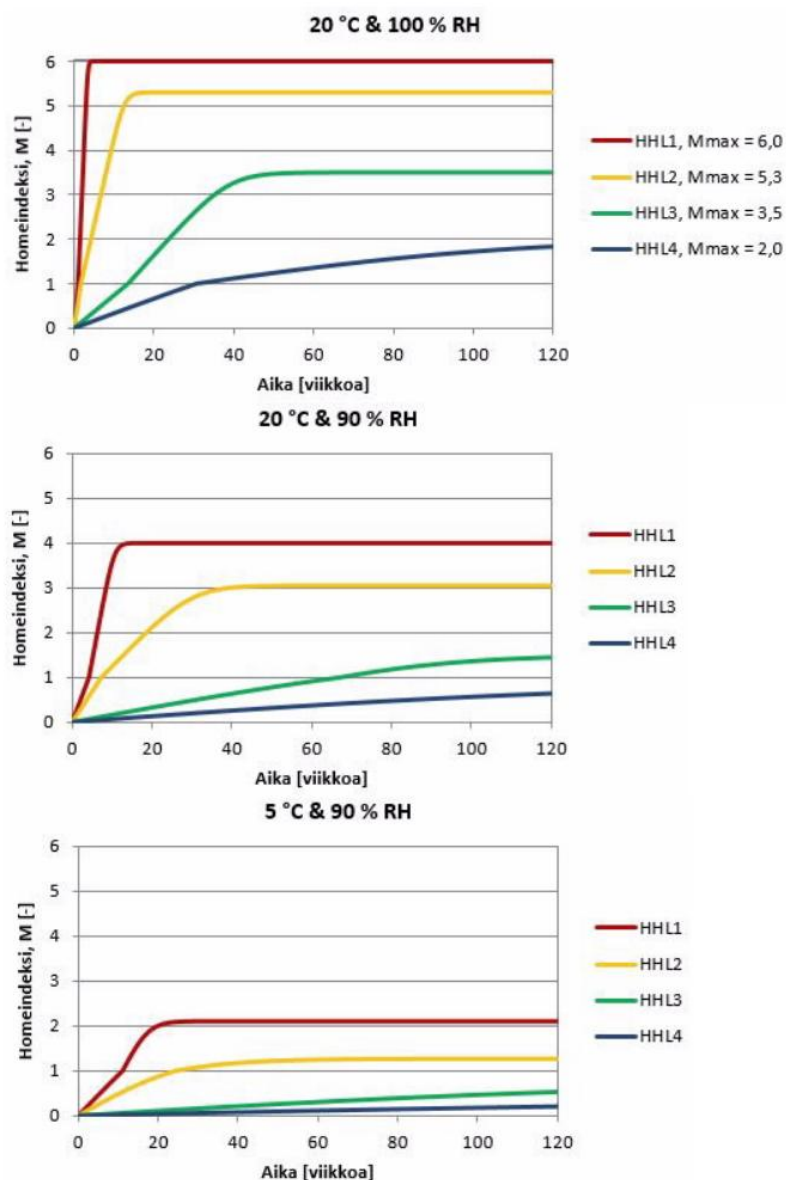
Rakennusmääräyskokoelman osassa C2, ”Määräykset ja ohjeet 1998” määrittellään kosteusteknisen suunnittelun olennainen vaatimus:

*Rakennus on suunniteltava siten, ettei siitä aiheudu sen käyttäjille tai naapureille hygienia- tai terveysriskiä kosteuden kertymisestä rakennuksen osiin tai sisäpinnoille. Rakennuksen näiden ominaisuuksien tulee normaalilla kunnossapidolla säilyä koko taloudellisesti kohtuullisen käyttöajan ajan.*  
(RakMK C2 1998.)

Kosteus aiheuttaa rakennuksissa monenlaisia haittoja, joista varmasti parhaiten tiedostettu on homeen kasvu ja siitä aiheutuvat terveysongelmat. Muita haittoja ovat rakenteiden kantokyvyn heikkeneminen puun lahoamisen ja teräksen korroosion vaikutuksesta, kostean lämmöneristeen heikentynyt eristyskyky sekä esteettiset haitat. (Künzel 1995.) Lisäksi kosteus voi aiheuttaa liimojen ja maalien tartunnan pettämistä, rakennusmateriaalien muodonmuutoksia sekä naulojen höltymistä puurakenteissa muodonmuutosten seurauksena (Vinha 2014).

Homeen kasvun edellytyksenä on kasvulle suotuisat lämpötila- ja kosteusolosuhteet ja ravinteiden saatavuus riittävän pitkäkestoisesti. Homeen kasvua arvioidaan VTT:n ja TTY:n kehittämällä homemallilla, jossa homeindeksi saa arvoja 0 – 6. Luokitustaso 0 vastaa puhdasta pintaa ja taso 6 erittäin runsasta homekasvua. Arvo määritetään paljaalla silmällä tai mikroskoopilla havaittavan homekasvun perusteella. Rakennusmateriaalit jaetaan

mallissa homehtumisherkkyysluokkiin (HHL) 1 – 4 sen mukaan, kuinka suotuisat olosuhteet materiaali luo homeen kasvuille. Luokkaan 1 kuuluvat erittäin herkäät materiaalit, kuten sahatavara, ja luokkaan 4 kestävät materiaalit, kuten metallit. Olosuhteiden vaikutusta homeen kasvuun on havainnollistettu kuvassa 5. (Vinha 2014, s. 60 – 64.)



Kuva 5. Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja homehtumisherkkyysluokan vaikutus homeen kasvun alkamiseen. (Tampereen teknillinen yliopisto 2017.)

Materiaaleista alkalinen uusi betoni kuuluu parhaaseen luokkaan HHL4 ”kestävä”, ja karbonatisoitunut vanha betoni sekä mineraalivilla kuuluvat luokkaan HHL3 ”kohtalaisen kestävä” (Vinha 2014, s. 60 – 64). Mikrobikasvun alkaminen betonin pinnalla riippuu siitä, onko pinta ilmaan rajoittuva vai tiivis ja onko pinnalla orgaanista materiaalia. Mikrobikasvuun tiiviissä betonirakenteessa, jossa ei ole orgaanista ainesta, vaaditaan Viitasen (2004) tutkimuksen mukaan 97 – 98 %:n suhteellinen kosteus. Sama arvo pätee myös puhtaille EPS- ja mineraalivillaeristeille. Sen sijaan betonipinnan rajoittuessa ilmaan ja sisältäessä orgaanista ainesta voi mikrobikasvu alkaa jo 78 – 80 %:n suhteellisessa kosteudessa.

Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden arvioinnissa tarvitaan toimintakriteerejä ja raja-arvoja. Kirjallisuudessa annetaan seuraavia vaihtoehtoisia kriteerejä:

- 1) Kosteusvirtojen tasapaino: Rakenteeseen tulevien ja siitä lähtevien kosteusvirtojen tulee olla vuositasolla tasapainossa, jotta kosteutta ei keräännä rakenteeseen. Rakenteen kuivumissuuntaisten kosteusvirtojen potentiaalin täytyy olla suurempi kuin kostumissuuntaisten. (Ojanen et al. 2016, s. 8.) Rakentamismääräyskokoelman osassa C2 määritellään, että kosteuden kertyminen rakennuksen osiin tai sisäpinnoille ei saa aiheuttaa hygienia- ja terveysriskiä (RakMK C2 1998).
- 2) Kondensoituminen: Kosteuden kondensoituminen rakenteen sisäpintaan tai rakennekerrosten väliin on merkki rakenteen riskialttiudesta. Arvioinnissa käytetään Glaser-menetelmää, jolla voidaan laskea kondensoituneen veden määrä käsinlaskentana. Nykyään käytettäessä laskentaohjelmia kriteeriksi voidaan asettaa joko kondensoituvan kosteuden kokonaismäärä tai yhtäjaksoinen kondensoitumisaika. (Hens 2012, s. 188 – 194; Vinha 2014, s. 59 – 60.)
- 3) Homeindeksi: Edellä esitelty VTT:n ja TTY:n kehittämä homemalli ottaa kondensoitumisen lisäksi huomioon rakennusmateriaalin homehtumisherkyyden ja homehtumiselle suotuisten olosuhteiden ajallisen keston. Homeindeksiä käytettäessä täytyy tiedostaa, että rakenteen eri kohtiin kohdistuu erilaisia vaatimuksia: sisäpuolisten pintojen tulee olla täysin puhtaita, kun taas ulkoilmaan tai maaperään rajoittuvien rakenteiden uloimmissa osissa joudutaan homeen kasvu hyväksymään. Olennaista on varmistaa, ettei homekasvun ja sisäilman välillä ole ilmayhteyttä. (Ojanen et al. 2016, s. 8 – 10.)
- 4) Materiaalien toiminnalliset ominaisuudet: Materiaaliominaisuuksien heikentymiseen, kuten lahoamiseen, tarvitaan suurempi kosteusrasitus kuin mikrobikasvun alkamiseen, joten jos rakenne toimii hyväksyttävästi homeen kasvun suhteen, täyttää sen myös materiaaliominaisuuksiin liittyvät toimintakriteerit (Vinha 2014, s. 57 – 58).
- 5) Materiaalien alkukosteus: Muiden kriteerien lisäksi täytyy rakennusmateriaalien alkukosteutta rajoittaa. Useimpien materiaalien alkukosteuden turvallisena ylärajana pidetään niiden tasapainokosteutta ilmassa, jonka suhteellinen kosteus on 80 %. Betonissa on valun jäljiltä huomattavasti enemmän kosteutta, ja betonin kohdalla tärkeää on riittävä kuivuminen ennen kuivumista hidastavien päällysteiden asentamista. (RakMK C2 1998; Ojanen et al. 2016, s. 8; Vinha 2014, s. 24 – 25.)

Rakennusfysiikan suunnittelussa ei käytetä varsinaisia varmuuskertoimia kuten kantavien rakenteiden suunnittelussa, mutta varmuutta voidaan lisätä valitsemalla tarkasteltaville kriteereille riittävän tiukat raja-arvot. Varmuutta saadaan myös käyttämällä laskennassa kosteusteknisen toiminnan kannalta mahdollisimman epäedullisia sisäilman olosuhteita ja sääolosuhteita. (Vinha 2014, s. 22 – 24.)

Laskennallisen tarkastelun yhteydessä on syytä arvioida myös rakenteiden vikasietoisuutta. Suunnitteluratkaisujen tulee jossakin määrin kestää materiaalien laatupoikkeamia, materiaalien ikääntymisen aiheuttamia muutoksia sekä virheitä rakennustyön toteutuksessa, käytössä ja ylläpidossa. Useimmat ulkovaipan rakenneratkaisut päästävät kovalla sateella jonkin verran vettä lävitseen saumoista ja liitoksista. Rakenteeseen syystä tai toisesta



joutuneen veden täytyy päästä kuivumaan, mikä varmistetaan useimmiten käyttämällä tuulettuvia rakenteita. (Vinha 2014, s. 22 – 23.)

## 3.2 Lämmönsiirron ilmiöt

### 3.2.1 Energiansäilymislaki

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan energiaa ei voi luoda eikä hävittää vaan energia voi ainoastaan muuntua erilaisiin muotoihin (Çengel 2006, s. 11). Rakennusfysiikan tarkasteluissa oletetaan, ettei systeemiin tehdä työtä eikä systeemissä tapahdu kemiallisia reaktioita. Lämpöenergian lisäksi ainoa huomioitava energiamuoto on aineen olomuotoihin liittyvä latentti energia. Näin ollen energiansäilymislaki pelkistyy muotoon (Künzel 1995):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q} \pm S_h \quad (4)$$

missä  $H$  on kokonaisentalpia [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]  
 $t$  on aika [ $\text{s}$ ]  
 $\nabla \cdot \vec{A}$  on lämpövuon divergenssi [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]  
 $S_h$  on lämmönlähde tai lämpönielu [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]

Kaavan (4) vasen puoli kuvaa systeemissä tapahtuvaa entalpian muutosta ajassa. Ajasta riippumattomissa tarkasteluissa tämän termin arvo on nolla. Oikean puolen ensimmäinen termi kuvaa systeemiin tulevan lämpövuon tiheyttä. Oikean puolen jälkimmäinen termi on lämmönlähde tai lämpönielu, jolla voidaan kuvata energian muuntumista energiamuodosta toiseen.

Jos tarkasteltava systeemi sisältää virtausta, täytyy energiansäilymislakiin sisällyttää virtaavan aineen mukanaan kuljettamaa entalpiaa kuvaava termi (COMSOL Multiphysics Heat Transfer Module User's Guide, s. 361 – 362):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \rho c_p \vec{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \vec{q} = \pm S_h \quad (5)$$

missä  $H$  on kokonaisentalpia [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]  
 $t$  on aika [ $\text{s}$ ]  
 $\rho$  on tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $c_p$  on ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J}/(\text{kg K})$ ]  
 $\vec{u}$  on fluidin virtausnopeus [ $\text{m}/\text{s}$ ]  
 $\nabla \vec{A}$  on lämpötilagradientti [ $\text{K}/\text{m}$ ]  
 $\nabla \cdot \vec{A}$  on lämpövuon divergenssi [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]  
 $S_h$  on lämmönlähde tai lämpönielu [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]

### 3.2.2 Lämmönsiirto

Lämpö siirtyy kolmella mekanismilla: johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä. Lämmön siirtyminen on seurausta lämpötilaerosta ja tapahtuu korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Staattisissa olosuhteissa lämpötilaerot tasautuvat, kunnes systeemi saavuttaa

tasapainotilan ympäristön kanssa. Rakennusfysiikassa ympäristön olosuhteet, erityisesti ulkoilman olosuhteet, ovat jatkuvassa muutoksessa.

### Johtuminen

Lämpö voi siirtyä johtumalla kiinteässä, nestemäisessä tai kaasumaisessa väliaineessa. Lämmön johtumista kuvaa Fourierin ensimmäinen laki (SFS-EN 15026 2007):

$$\vec{q}_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (6)$$

missä  $\vec{q}_{cond}$  on johtumalla siirtyvä lämpövuoto [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $\lambda$  on lämmönjohtavuus [ $\text{W}/(\text{m K})$ ]  
 $\nabla T$  on lämpötilagradientti [ $\text{K}/\text{m}$ ]

Johtumalla siirtyvän lämpövuon suuruus riippuu lämpötilagradientista ja materiaalin lämmönjohtavuudesta. Lämpövuon suunta on korkeammasta lämpötilasta matalampaan, mistä seuraa termin negatiivinen etumerkki. Huokoisissa rakennusmateriaaleissa lämmönjohtavuus on riippuvainen materiaalin kosteuspitoisuudesta.

### Konvektio

Konvektiivinen lämmönsiirto perustuu virtaavaan fluidiin, joka kuljettaa mukanaan lämpöenergiaa. Konvektio voi olla joko pakotettua konvektiota, jolloin ulkoiset voimat aiheuttavat virtauksen, tai luonnollista konvektiota, jolloin virtaus aiheutuu fluidin tiheyseroista. Virtaavan fluidin mukana siirtyvä energia lasketaan kaavalla (7) (COMSOL Multiphysics Heat Transfer Module User's Guide, s. 361 – 362):

$$q_{flow} = \rho c_p \vec{u} \cdot \nabla T \quad (7)$$

missä  $q_{flow}$  on virtaavan fluidin siirtämä lämpömäärä [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]  
 $\rho$  on fluidin tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $c_p$  on fluidin ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J}/(\text{kg K})$ ]  
 $\vec{u}$  on fluidin virtausnopeus [ $\text{m}/\text{s}$ ]  
 $\nabla T$  on lämpötilagradientti [ $\text{K}/\text{m}$ ]

Pinnan ja ympäristön välistä konvektiivista lämmönsiirtoa kuvataan Newtonin jäähtymislaitilla (kaava (8)) (Çengel 2006, s. 26). Kaavassa konvektiokerroin  $h_c$  kuvaa sekä pinnan että fluidin ominaisuuksia: pinnan karheutta ja geometriaa sekä virtauksen nopeutta ja virtaavan aineen ominaisuuksia.

$$q_{conv} = h_c (T_s - T_\infty) \quad (8)$$

missä  $q_{conv}$  on konvektiolla pinnasta ilmaan siirtyvä lämpövuoto [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $h_c$  on konvektiokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ ]  
 $T_s$  on pinnan lämpötila [ $\text{K}$ ]  
 $T_\infty$  on ilman lämpötila riittävällä etäisyydellä pinnasta [ $\text{K}$ ]

Rakennusfysiikassa oletetaan useimmiten, että rakenteet ovat niin tiiviitä, ettei niiden lävitse kulje ilmavirtoja (SFS-EN 15026 2007). Lämmönsiirto konvektiolla vaikuttaa siten pääasiassa lämmönsiirtoon rakenteen ja ilman rajapinnoilla. Lisäksi konvektiota voi

tapahtua myös huokoisen, ilmaa läpäisevän materiaalin sisällä. Ilmiötä kutsutaan sisäiseksi konvektioksi.

Yksityiskohtaisten teoreettisten tarkastelujen sijaan rakennusfysiikassa käytetään yleensä määritettyjä konvektiokertoimien arvoja. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää pintavastusta, joka on konvektiokertoimen käänteisarvo. Rakennusmääräyskokoelman osassa C4 (RakMK C4 2003) määritellään arvot sisä- ja ulkopuolisille pintavastuksille rakennusosan orientaatiosta riippuvina taulukkoarvoina.

### Säteily

Kolmas ja viimeinen lämmönsiirtomekanismi on säteily. Säteily ei tarvitse siirtyäkseen väliainetta kuten johtuminen ja konvektio. Kappaleen emittoiman säteilyn teoreettista maksimiarvoa kutsutaan mustan kappaleen säteilyksi, ja sen suuruus voidaan laskea Stefan-Boltzmannin lailla (Çengel 2006, s. 27 – 28):

$$q_{rad,max} = \sigma T_s^4 \quad (9)$$

missä  $q_{rad,max}$  on mustan kappaleen emittoima lämpövuoto [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $\sigma$  on Stefan-Boltzmann-vakio [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ ]  
 $T_s$  on pinnan lämpötila [K]

Todellisten pintojen emittoima ja absorptioima säteily on suuruudeltaan tätä maksimiarvoa pienempää. Emissiokerroin  $\varepsilon$  ja absorptiokerroin  $\alpha$  kuvaavat todellisen pinnan säteilyä suhteessa mustan kappaleen säteilyyn. Käytännön sovelluksissa emissiokerroin ja absorptiokerroin oletetaan yhtä suuriksi. Kahden pinnan välinen säteilyllä siirtyvä nettolämmönsiirto lasketaan kaavan (10) mukaisesti. (Çengel 2006, s. 28 – 29.)

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (10)$$

missä  $q_{rad}$  on säteilyllä siirtyvä lämpövuoto [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $\varepsilon$  on pinnan emissiokerroin [-]  
 $\sigma$  on Stefan-Boltzmann-vakio [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ ]  
 $T_s$  on pinnan lämpötila [K]  
 $T_{surr}$  on ympäröivien pintojen lämpötila [K]

Rakenteissa säteilyn vaikutus on suurin ulkopinnalla, jossa auringon säteily lämmittää seinien ja katon pintaa. Lisäksi öisin seinien, ikkunoiden ja katon ulkopinnat voivat jäähtyä niin sanotun taivaan vastasäteilyn vaikutuksesta eli säteilemällä lämpöä kylmälle taivaalle. Rakenteiden sisällä lämpötilaerot ovat niin pieniä, ettei säteilylämmönsiirtoa tarvitse huomioida.

### 3.2.3 Latentti lämpö

Veden olomuodonmuutoksissa sitoutuu ja vapautuu merkittäviä määriä energiaa, mikä täytyy sisällyttää energiataseeseen. Kosteuden tiivistymisessä vapautuva energia otetaan huomioon lähdeterminä ja vastaavasti höyrystymisessä sitoutuva energia nieluteterminä. (Künzel 1995, s. 28 – 29.) Lähdetermin suuruus lasketaan kaavalla (11) (Künzel 1995, s. 28 – 29; SFS-EN 15026 2007).

$$S_h = -\nabla \cdot \vec{q}_{lat} = -l_{lv} \nabla \cdot \vec{g}_v \quad (11)$$

missä  $S_h$  on lämmönlähde [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]  
 $\nabla \cdot \vec{A}_{lat}$  on latentin lämpövuon divergenssi [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]  
 $l_{lv}$  on veden höyrystymislämpö [ $\text{J}/\text{kg}$ ]  
 $\nabla \cdot \vec{A}_v$  on vesihöyryn massavirran divergenssi [ $\text{kg}/(\text{m}^3 \text{ s})$ ]

Myös jäätyminen on Suomen olosuhteissa mahdollista rakenteiden uloimmissa kerroksissa. Rakennusfysiikan alalla käytetyissä laskentaohjelmissa tätä ei kuitenkaan yleensä sisällytetä laskentamalleihin (Vinha 2014, s. 59). Jäätyminen ei myöskään ole mukana eurooppalaisessa standardissa EN 15026 (SFS-EN 15026 2007).

### 3.2.4 Lämmön varastoituminen

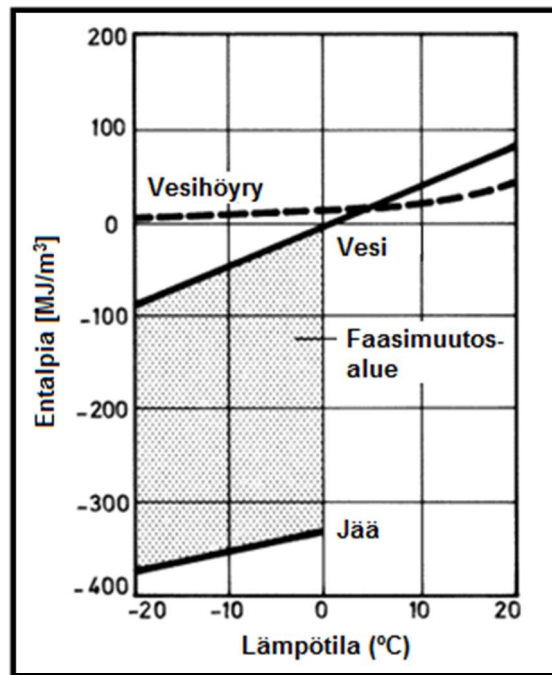
Materiaalit varastoivat lämpöä ominaislämpökapasiteettinsa mukaisen määrän. Kiinteille aineille ja nesteille voidaan käyttää ominaislämpökapasiteetille vakioarvoa. Kaasujen tapauksessa arvo on riippuvainen kaasun termodynaamisesta tilasta. Entalpian muutos lasketaan kaavalla (12). (Hens 2012, s. 15 – 16.)

$$\frac{\partial H}{\partial t} = c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

missä  $H$  on kokonaisentalpia [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]  
 $t$  on aika [ $\text{s}$ ]  
 $c_p$  on materiaalin ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J}/(\text{kg K})$ ]  
 $\rho$  on materiaalin tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $T$  on lämpötila [ $\text{K}$ ]

Rakennusmateriaalin kosteuspitoisuus vaikuttaa varastoituvan lämpöenergian määrään. Tässä yhteydessä tarkastellaan paikallaan olevaa, materiaaliin sitoutunutta kosteutta ja siihen sitoutunutta energiaa, ei kosteuden siirtymisen mukana siirtyvää energiaa. (Künzel 1995, s. 25 – 27.)

Kuvassa 6 on esitetty veden eri olomuotojen entalpia lämpötilan funktiona rakenteita koskevassa lämpötila-alueessa. Kuvaajasta havaitaan, että vesihöyryn entalpiamuutos on vähäinen verrattuna veden ja jään entalpiamuutokseen, minkä vuoksi vesihöyryn varastoima energia voidaan sivuuttaa merkityksettömänä. Vesihöyryn sisältämä latentti lämpö huomioidaan kuitenkin kaavan (11) mukaisesti. (Künzel 1995, s. 25 – 27.)



Kuva 6. Veden eri olomuotojen entalpia lämpötilan funktiona tilavuusyksikköä kohti normaalipaineessa. Vesihöyryn oletetaan olevan kyllästystilassa. Referenssipisteenä on nestemäisen veden entalpia lämpötilassa 0 °C.

Künzelin (1995, s. 25 – 27) mukaan materiaaliin sitoutuneen kosteuden entalpian muutos voidaan laskea kaavalla (13).

$$\frac{\partial H_w}{\partial t} = \left[ (w - w_i) c_{p,w} + w_i c_{p,i} - h_i \frac{\partial w_i}{\partial T} \right] \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

missä  $H_w$  on kosteuden entalpia [ $\text{J/m}^3$ ]  
 $t$  on aika [s]  
 $w$  on kosteuspitoisuus materiaalissa [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $w_i$  on jään pitoisuus materiaalissa [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $c_{A,\bar{A}}$  on veden ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J}/(\text{kg K})$ ]  
 $c_{\bar{A},\bar{A}}$  on jään ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J}/(\text{kg K})$ ]  
 $h_i$  on veden sulamislämpö [ $\text{J/kg}$ ]

Koska jäätyminen ei ole mukana standardin EN 15026 (SFS-EN 15026 2007) mukaisessa laskentatavassa, yksinkertaistuu kaava muotoon:

$$\frac{\partial H_w}{\partial t} = c_{p,w} w \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

missä  $H_w$  on materiaaliin sitoutuneen kosteuden entalpia [ $\text{J/m}^3$ ]  
 $t$  on aika [s]  
 $c_{A,\bar{A}}$  on veden ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J}/(\text{kg K})$ ]  
 $w$  on kosteuspitoisuus materiaalissa [ $\text{kg/m}^3$ ]

### 3.3 Kosteudensiirron ilmiöt

#### 3.3.1 Massan säilymislaki

Massan säilymislain mukaan ainetta ei voi luoda eikä hävittää. Veden eri olomuodoille voidaan kirjoittaa massan tasapainoyhtälöt, joiden mukaan systeemissä olevan veden, höyryn ja jään määrä muuttuu ajassa systeemiin tulevien ja siitä poistuvien kosteusvirtojen sekä lähde- ja nielutermien verran.

Kaava (15) on nestemäisen veden tasapainoyhtälö. Oikean puolen jälkimmäinen termi on veden olomuotojen muutoksiin liittyvä lähdetermi. Tiivistyminen ja sulaminen ovat nestemäisen veden lähteitä, ja höyrystyminen ja jäätyminen ovat nestemäisen veden nieluja. (Hens 2012, s. 268 – 269.)

$$\frac{\partial w_l}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{g}_l \pm G_l \quad (15)$$

missä  $w_l$  on materiaalissa olevan nestemäisen veden määrä [kg/m<sup>3</sup>]  
 $t$  on aika [s]  
 $\nabla \cdot \vec{A}_l$  on nestemäisen veden massavirran divergenssi [kg/(m<sup>3</sup> s)]  
 $G_l$  on nestemäisen veden lähde tai nielu [kg/(m<sup>3</sup> s)]

Vastaava yhtälö voidaan kirjoittaa myös vesihöyrylle (kaava (16)). Höyrystyminen ja sublimoituminen ovat vesihöyryn lähteitä, ja tiivistyminen ja härmistyminen ovat vesihöyryn nieluja. (Hens 2012, s. 268 – 269.)

$$\frac{\partial w_v}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{g}_v \pm G_v \quad (16)$$

missä  $w_v$  on materiaalissa olevan vesihöyryn määrä [kg/m<sup>3</sup>]  
 $t$  on aika [s]  
 $\nabla \cdot \vec{A}_v$  on vesihöyryn massavirran divergenssi [kg/(m<sup>3</sup> s)]  
 $G_v$  on vesihöyryn lähde tai nielu [kg/(m<sup>3</sup> s)]

Jään tapauksessa yhtälö saa kaavan (17) mukaisen muodon, jossa jään lähteitä ovat jäätyminen ja härmistyminen ja jään nieluja ovat sulaminen ja sublimoituminen. Jään käyttäytyminen eroaa nestemäisen veden ja höyryn käyttäytymisestä, sillä jäällä ei ole massavirtaa. (Hens 2012, s. 268 – 269.)

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} = \pm G_i \quad (17)$$

missä  $w_i$  on materiaalissa olevan jään määrä [kg/m<sup>3</sup>]  
 $t$  on aika [s]  
 $G_i$  on jään lähde tai nielu [kg/(m<sup>3</sup> s)]

Veden eri olomuotojen tasapainoyhtälöt voidaan yhdistää yhdeksi kosteuden tasapainoyhtälöksi. Lähde- ja nielutermi kumoavat tällöin toisensa (kaava (18)), sillä tiivistyminen ja höyrystyminen, sulaminen ja jäätyminen sekä härmistyminen ja sublimoituminen ovat

toisilleen vastakkaisia ilmiöitä. Kokonaiskosteuspitoisuus voidaan ilmaista veden eri olomuotojen pitoisuuksien summana (kaava (19)). Kosteuden tasapainoyhtälö saa siten kaavan (20) mukaisen muodon. (Hens 2012, s. 268 – 269.)

$$G_l + G_v + G_i = 0 \quad (18)$$

$$w = w_l + w_v + w_i \quad (19)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{g}_l + \vec{g}_v) \quad (20)$$

missä  $w$  on kokonaiskosteuspitoisuus [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $t$  on aika [s]  
 $\vec{g}_l$  on nestemäisen veden massavirta [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]  
 $\vec{g}_v$  on vesihöyryn massavirta [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]

### 3.3.2 Kosteuden varastoituminen rakenteisiin

Ilmakehän olosuhteissa huokoisen materiaalin huokokset täyttyvät ilmalla, jolla on olosuhteista riippuva suhteellinen kosteus. Ilmasta sitoutuu materiaalin huokosten pinnalle kosteutta hygroskooppisesti. Materiaalin ollessa kosketuksissa nestemäiseen veteen siihen sitoutuu puolestaan kapillaarista kosteutta. (Vinha 2005, s. 44 – 45.) Kosteuden varastoitumisen voi rinnastaa ilmiönä lämmön varastoitumiseen (Hens 2012, s. 174).

Tutkittaessa hygroskooppisesti aktiivisen huokoisen materiaalin kosteuspitoisuutta suhteellisen kosteuden funktiona saadaan tulokseksi hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä, jonka muoto muistuttaa s-kirjainta (kuva 7). Käyrältä voidaan lukea, paljonko kosteutta materiaaliin sitoutuu tietyssä lämpötilassa ja suhteellisessa kosteudessa sen saavutettua tasapainotilan ympäröivän ilman kanssa. (Krus 1996.) Kirjallisuudessa annetaan hygroskooppisen alueen ylärajalle arvoja väliltä  $\text{RH} = 95 \dots 98\%$  (Hens 2012 s. 173; Künzeli 1995, s. 6; Krus 1996, s. 13).

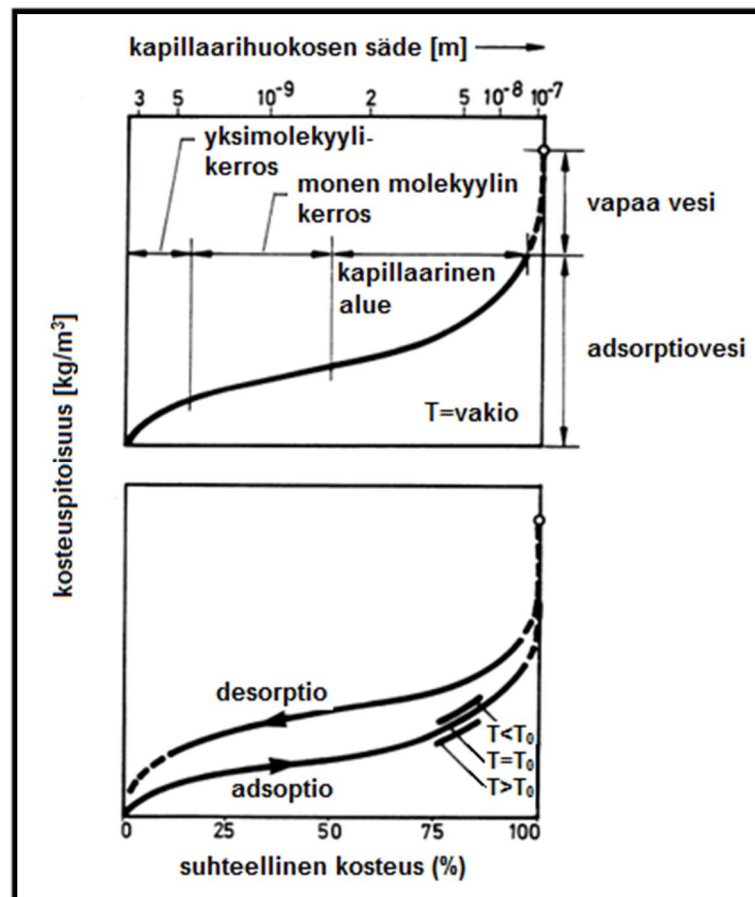
Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä annetaan tietyssä lämpötilassa. Materiaalit sitovat kosteutta enemmän matalissa kuin korkeissa lämpötiloissa (kuva 7). (Pitkäranta 2016, s. 103 – 106.) Usein lämpötilariippuvuus todetaan rakennusfysiikan kontekstissa vähäpätöiseksi ja jätetään huomiotta (Künzel 1995; SFS-EN 15026 2007).

Materiaalin sitoma hygroskooppinen kosteus riippuu kosteushistoriasta, sillä kastumisen (adsorptio) ja kuivumisen (desorptio) tasapainokäyrät eroavat toisistaan (kuva 7). Ilmiötä kutsutaan hystereesiksi. EN 15026 -standardin (SFS-EN 15026 2007) mukaisessa laskentamenetelmässä hystereesiä ei huomioida. Künzelin (1995) mukaan kastumisen tasapainokäyrä kuvaa riittävällä tarkkuudella sekä kastumista että kuivumista, ja jos hystereesi on materiaalilla voimakasta, voidaan tasapainokäyränä käyttää kastumisen ja kuivumisen tasapainokäyrien keskiarvoa.

Hygroskooppista aluetta seuraa tasapainokäyrällä kapillaarinen alue. Kapillaarinen tasapainotila on kosteuspitoisuus, joka saavutetaan ilman ulkoisten voimien vaikutusta materiaalin ollessa kosketuksissa vapaaseen veteen. (Krus 1996.) Kapillaarinen tasapaino voidaan saavuttaa, jos materiaali on kontaktissa vapaaseen veteen tai toiseen kapillaarisella

alueella olevaan materiaaliin, kuten maaperään, tai jos materiaalissa on rakennuskosteutta. Kapillaarisella alueella materiaaliin voi sitoutua huomattavasti suurempia määriä kosteutta kuin hygroskooppisella alueella. Rakennusmateriaalin kastuminen kapillaarisesti siirtyvän veden takia on yleensä virhetilanne, ellei rakennetta ole erityisesti suunniteltu kestämaan tätä räsitusta. (Pitkäranta 2016, s. 103 – 106.)

Kapillaarinen tasapainokosteus voidaan ylittää paineen tai lämpötilagradientin vaikutuksesta. Supersaturaatio eli vedellä kyllästäminen johtaa äärimmillään kaikkien huokosten täyttymiseen vedellä. (Künzel 1995.) Tämä kastumisen alue koskee harvoin rakennusmateriaaleja, joten se voidaan jättää huomiotta.



*Kuva 7. Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä. Ylemmästä kuvaajasta nähdään, kuinka kostuminen etenee pienemmistä huokosista suurempiin. Alemmasta kuvaajasta käy ilmi hystereesi-ilmiö sekä tasapainokosteuskäyrän lämpötilariippuvuus. (Krus 1996, suomennos KS.)*

Eri materiaaleilla on erilaisia kosteuden varastointiin liittyviä ominaisuuksia. Muun muassa sementtipohjaiset materiaalit ja puu ovat hygroskooppisia ja kapillaarisesti aktiivisia (Künzel 1995). Sen sijaan useimmat lämmöneristeet eivät sido juuri lainkaan vettä hygroskooppisesti tai kapillaarisesti ja ne kastuvat vasta suhteellisen kosteuden ollessa 100 % (Vinha 2005, s. 41, 88; Künzel 1995, s.6 – 7).

Kosteuden varastoituminen materiaaleihin tasoittaa suhteellisen kosteuden vaihteluja samaan tapaan kuin lämpöä varastoiva rakennusosa tasoittaa lämpötilavaihteluja.



Seurauksena on myönteinen vaikutus rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimivuuteen: Joissakin tapauksessa stationäärinen laskenta antaa tulokseksi, että kosteutta kondensoituu rajapinnoille, mutta käytännössä rakenteessa tapahtuu vain hygroskooppisesti sitoutuneen kosteuden määrän kasvua. (Hens 2012, s. 177.) Kuivan ja hygroskooppisesti aktiivisen materiaalin suhteellisen kosteuden nostamiseen mikrobikasvulle kriittiselle tasolle 80 % tarvitaan huomattavasti suurempi määrä kosteutta kuin materiaalin ollessa ei-hygroskooppista (Pitkäranta 2016, s. 105).

### 3.3.3 Kosteudensiirtomekanismit

Kosteus voi siirtyä rakenteissa joko vetenä tai vesihöyrynä. Kosteus siirtyy useilla eri kosteudensiirtomekanismeilla, joiden taustalla vaikuttaa erilaisia potentiaalieroja. Tässä työssä tarkasteltavat kosteudensiirtomekanismit on koottu taulukkoon 5. Vesihöyryn ja nestemäisen veden siirtyminen tapahtuvat hygroskooppisella alueella pääasiassa toisistaan riippumattomina ilmiöinä, sillä vesihöyryn siirtyminen diffuusiolla on voimakkainta suuremmissa huokosissa ja nestemäisen veden siirtyminen kapillaarisella imulla on voimakkainta mikrohuokosissa. (Künzel 1995.)

*Taulukko 5. Kosteudensiirtomekanismit. (Künzel 1995.)*

Ilmiö	Veden olomuoto	Potentiaaliero
Fickin ja Knudsenin diffuusio	höyry	vesihöyryn osapaine
pintadiffuusio	neste	suhteellinen kosteus
kapillaarinen imu	neste	huokosalipaine
painovoimainen siirtyminen	neste	painovoima
kosteuskonvektio	höyry	kokonaispaine

#### Diffuusio

Diffuusio on massansiirtomekanismi, joka aiheutuu kaasujen konsentraatioerojen tasaantumista. Vastaava ilmiö lämmönsiirrossa on lämpötilaerojen tasaantuminen johtamalla. Myös lämpötilagradientti ja kokonaispaineen gradientti aiheuttavat diffuusiota, mutta niiden osuus on rakennusten tapauksessa merkityksetön. (Künzel 1995.)

Huokoisessa materiaalissa diffuusio on yhdistelmä Fickin ja Knudsenin diffuusiota. Fickin diffuusiolla kuvataan konsentraatioerojen tasoittumista ilmassa. Huokoisessa materiaalissa diffuusio muistuttaa ilmassa tapahtuvaa diffuusiota suurissa huokosissa, joiden säde on vähintään 1 µm. Pienissä, säteeltään alle 5 nm kokoisissa huokosissa molekyylit törmäävät useammin huokosen seinämiin kuin toisiinsa. Ilmiötä kutsutaan Knudsenin diffuusioksi. Jos huokosen säde on välillä 5 nm...1 µm, on siirtymismekanismi yhdistelmä Fickin diffuusiota ja Knudsenin diffuusiota. (Künzel 1995.)

Kaasujen diffuusiota mallinnetaan yksinkertaistetusti diffuusiiovastuksen avulla, joka yhdistää molemmat kaasujen diffuusiomekanismit. Diffuusiolla siirtyvän vesihöyryn massavuon tiheys lasketaan kaavoilla ((21) – (24)). Kaavassa olevalle materiaalin diffuusiiovastuskertoimelle  $\mu$  voidaan käyttää hygroskooppisella alueella vakioarvoa. (Künzel 1995.)

Kolmas diffuusion muoto on pintadiffuusio. Huokosten pinnalle adsorboituu kosteasta huokosilmasta vesimolekyylejä (kuva 8). Adsorboitunut vesi on olomuodoltaan nestettä, ja kerroksen paksuus on riippuvainen suhteellisesta kosteudesta. Koska suhteellisen kosteuden

ja vesihöyryn osapaineen potentiaalierot vaikuttavat usein vastakkaisiin suuntiin, siirtyy kosteus pintadiffuusion vaikutuksesta vastakkaiseen suuntaan kuin Fickin ja Knudsenin diffuusion vaikutuksesta. Pintadiffuusion osuus sisällytetään laskennassa veden kapillaarisen siirtymisen kaavaan. (Künzel 1995.)

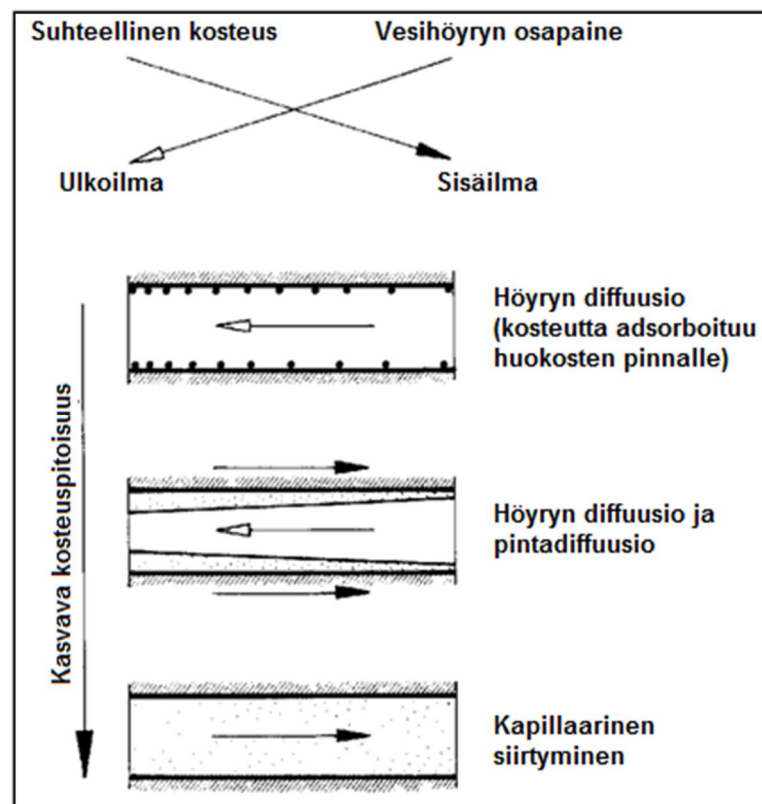
$$\vec{g}_v = -\delta_p \nabla p_v \quad (21)$$

$$\delta_p = \frac{\delta}{\mu} \quad (22)$$

$$\delta = 2,0 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{T^{0,81}}{P_\infty} \quad (23)$$

$$\vec{g}_v = -\delta_p \nabla(\varphi p_{v,sat}) \quad (24)$$

missä  $\vec{A}_v$  on vesihöyryn massavuon tiheys [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]  
 $\delta_p$  on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys [ $\text{kg}/(\text{m s Pa})$ ]  
 $\nabla \vec{A}_v$  on vesihöyryn osapaineen gradientti [Pa]  
 $\delta$  on ilman vesihöyrynläpäisevyys [ $\text{kg}/(\text{m s Pa})$ ]  
 $\mu$  on materiaalin diffuusiovastuskerroin [-]  
 $T$  on lämpötila [K]  
 $P_\infty$  on ilmanpaine [Pa]  
 $\varphi$  on suhteellinen kosteus [-]  
 $p_{v,\text{AAA}}$  on vesihöyryn kyllästyspaine [Pa]



Kuva 8. Huokoisessa materiaalissa vaikuttavat kosteudensiirtomekanismit. (Künzel 1995, suomennos KS.)

## Kapillaarinen imu

Huokoinen materiaali imee vettä kapillaarisesti ollessaan kosketuksissa nestemäiseen veteen. Kapillaarisen kosteuden lähteitä ovat sadevesi, maaperän kosteus, rakennuskosteus ja kondensoitunut kosteus (Hens 2012, s. 211). Kapillaarisen siirtymisen edellytys on materiaalissa oleva yhtenäinen huokosverkko.

Kapillaarinen imu on seurausta aineiden molekyylien välisistä voimista. Vesimolekyylien välillä vaikuttavat koheesiovoimat vetävät vesimolekyyliä toisiaan kohti. Veden ja huokoisen materiaalin pinnan välillä vaikuttaa adheesiovoima, jolla vesimolekyyli ja materiaalin pinnan molekyylit vetävät toisiaan puoleensa. Vastaavasti ilman ja veden välillä vaikuttaa vetovoima. Koska kivipohjaisen materiaalin, kuten betonin, ja veden välinen adheesio on voimakkaampaa kuin ilman vetovoima, muodostuu vesipatsaan pintaan alipaine. Vesi siirtyy alipaineen vaikutuksesta huokosen pintaa pitkin huokosverkossa eteenpäin, kunnes se saavuttaa voimatasapainon painovoiman kanssa. Kapillaarinen imu on voimakkainta pienimmissä huokosissa, joissa on eniten huokospinta-alaa. (Hens 2012, s. 211 – 213.)

Kapillaarisen imun aikaansaama massavirta voidaan laskea Darcyn lain (kaava (25)) avulla (Lü 2002).

$$\vec{g}_l = -D_l \nabla P_c \quad (25)$$

missä  $\vec{g}_l$  on nestemäisen veden massavuon tiheys [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]  
 $D_l$  on kapillaarinen kosteudenjohtavuus [ $\text{kg}/(\text{m s Pa})$ ]  
 $\nabla P_c$  on kapillaarisen alipaineen gradientti [ $\text{Pa}/\text{m}$ ]

Jotta kosteudensiirtomekanismit voidaan sisällyttää yhteen tasapainoyhtälöön, tulee sekä vesihöyryn että nestemäisen veden siirtyminen ilmaista saman potentiaalisuureen avulla. Parhaiten tämä onnistuu käyttämällä suhteellista kosteutta kosteudensiirron potentiaalina. Kapillaarinen kosteudensiirto voidaan laskea kaavalla (26) (Künzel 1995, s. 8 – 20).

$$\vec{g}_l = -D_\varphi \nabla \varphi \quad (26)$$

missä  $\vec{g}_l$  on nestemäisen veden massavuon tiheys [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]  
 $D_\varphi$  on kapillaarinen kosteudenjohtavuus [ $\text{kg}/(\text{m s})$ ]  
 $\nabla \varphi$  on suhteellisen kosteuden gradientti [ $1/\text{m}$ ]

Molemmat nesteen virtauksen kertoimet  $D_l$  ja  $D_\varphi$  määritetään kokeellisesti ja ne sisältävät myös pintadiffuusiosta aiheutuvan nesteen siirtymisen (Künzel 1995, s. 17).

## Painovoimainen siirtyminen

Veden painovoimainen siirtyminen vaikuttaa merkittäväällä tavalla rakennusten kosteustekniseen toimintaan. Rakennus tulee suunnitella siten, että sadevesi ohjautuu painovoimaisesti pois rakennuksen luolta. Esimerkiksi tasakatolle tulee suunnitella kattokaivoja ja viemäröintijärjestelmä. Myös salaojitus perustuu veden painovoimaiseen siirtymiseen. (Pitkäranta 2016, s. 112 – 113.)

Vesi valuu painovoimaisesti pystysuorilla ja kaltevilla pinnoilla. Tuuletetussa ulkoseinässä ulkoverhous ottaa vastaan suurimman osan viistosateesta, ja sadevesi valuu verhouksen

pintoja pitkin salaojituserroksen rasittamatta sisempiä rakennekerroksia. Esimerkiksi metallikaseteilla verhottuun betoniseinään kohdistuu näin ollen pienempi viistosaderasitus kuin paljaaseen betoniseinään. Myös runsas kondensaatio materiaalien rajapinnoilla voi johtaa veden valumiseen rakenteen alaosiin ja synnyttää sinne kosteuskertymiä (Vinha 2014, s. 59).

Painovoimainen siirtyminen on hallitseva kosteudensiirtymismekanismi kapillaarisesti heikosti vettä imevissä materiaaleissa, kuten sorassa. Tässä työssä tarkasteltavassa yläpohjarakenteessa, kevytsorakatossa, tulee painovoimainen siirtyminen ottaa huomioon, sillä katossa tiivistymisestä tai katevuodosta peräisin oleva nestemäinen vesi valuu painovoimaisesti kevytsorakerroksen läpi vesitiiviiseen höyrinsulkukerrokseen asti (Vahanen 2012a). Painovoimaisen siirtymisen vaikutus on sen sijaan vähäinen kapillaarisesti aktiivisissa materiaaleissa, kuten betonissa ja tiilessä. Näissä materiaaleissa vesi siirtyy painovoiman vaikutuksesta vain saumoissa, liitoksissa ja halkeamissa. (Pitkäranta 2016, s. 112 – 113.)

Painovoiman ja paine-erojen aiheuttama kosteudensiirtyminen on makroskooppinen ilmiö, joka ei sisälly mikroskooppisia ilmiöitä käsittelevään massansiirron teoriaan (Çengel 2006, s. 773; Künzeli 1995). Painovoimainen siirtyminen ei myöskään ole mukana rakennusfysiikan laskentaohjelmissa (Vinha 2014, s. 59). Painovoimaisen siirtymisen laskentamalleihin sisällyttämisen tarpeellisuus tulee harkita tapauskohtaisesti.

### Kosteuskonvektio

Kosteuskonvektiolla tarkoitetaan kosteuden siirtymistä ilmavirtauksen mukana. Vastaava lämmönsiirron ilmiö on lämmön konvektio. Rakennusfysiikan laskennallisissa tarkasteluissa rakenteet oletetaan tiiviiksi eikä ilmavirtauksia rakenteiden läpi huomioida (Künzel 1995; SFS-EN 15026 2007). Näin ollen kosteuskonvektio huomioidaan vain rakenteen pinnoilla vastaavalla tavalla kuin lämmön konvektio (kaava (27)) (Hens 2012, s. 204).

$$g_v = \beta(p_{v,s} - p_{v,\infty}) \quad (27)$$

missä  $g_v$  on kosteuden massavirran tiheys pinnalta ympäristöön [kg/(m<sup>2</sup> s)]  
 $\beta$  on pinnan diffuusiokerroin [s/m]  
 $p_{v,s}$  on vesihöyryn osapaine pinnalla [Pa]  
 $p_{v,\infty}$  on vesihöyryn osapaine riittävällä etäisyydellä pinnasta [Pa]

Kerroin  $\beta$  on pinnan diffuusiokerroin, joka kuvastaa pinnan kykyä läpäistä kosteusvirtaa. Sen arvo voidaan johtaa konvektiokertoimen  $h_c$  arvosta kaavalla (28). Pinnan diffuusiota hidastava vaikutus on niin vähäinen, että se voidaan jättää huomiotta arvioitaessa diffuusiovirtaa koko rakenteen läpi. Sen sijaan tarkasteltaessa kosteudensiirtoa pinnan ja ilman välillä esimerkiksi tutkittaessa pinnan kuivumista täytyy pinnan vastus ottaa huomioon. (Hens 2012, s. 204 – 206.)

$$\beta = 7,7 \cdot 10^{-9} \cdot h_c \quad (28)$$

missä  $\beta$  on pinnan diffuusiokerroin [s/m]  
 $h_c$  on konvektiokerroin [W/(m<sup>2</sup> K)]

Ilmavirta rakenteiden läpi on virhetilanne. Ilmavirtaa esiintyy kuitenkin rakenteissa tuuletuksen muodossa tuuletusvälissä, tuuletusurissa tai kevytsoratapauksessa eristämateriaalissa. Kosteusvirta konvektiolla riippuu ilman massavirran suuruudesta ja ilman kosteuspitoisuudesta kaavan (29) mukaisesti (Leivo & Rantala 2000, s. 21):

$$g_{conv} = x\dot{m} \quad (29)$$

missä  $g_{conv}$  on kosteuskonvektiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys [kg/s]  
 $x$  on ilman kosteuspitoisuus [kg/kg]  
 $\dot{A}$  on ilman massavirta [kg/s]

COMSOL Multiphysics -ohjelmassa käytetään konvektiolla siirtyvän kosteusvirran laskemiseen vesihöyryn konsentraatiota (COMSOL Multiphysics Heat Transfer Module User's Guide, s. 513):

$$g_{conv} = \vec{u} \cdot \nabla (M_v \varphi c_{v,sat}) \quad (30)$$

missä  $g_{conv}$  on kosteuskonvektiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys [kg/s]  
 $\vec{u}$  on ilman virtausnopeus [m/s]  
 $M_v$  on vesihöyryn moolimassa [kg/mol]  
 $\varphi$  on virtaavan ilman suhteellinen kosteus [-]  
 $c_{A,sat}$  vesihöyryn kyllästyskonsentraatio [mol/m<sup>3</sup>]

### 3.4 Lämpötila- ja kosteusjakauman ratkaiseminen

#### 3.4.1 Lämmön- ja kosteudensiirron kytkeytyminen toisiinsa

Huokoisissa materiaaleissa esiintyvät lämmön- ja kosteudensiirron ilmiöt ovat tiiviisti kytköksissä toisiinsa. Aiemmin tässä luvussa esitetyn mukaisesti täytyy seuraavat ilmiöt sisällyttää laskennalliseen tarkasteluun:

- Ilman kyky sitoa kosteutta riippuu lämpötilasta. Ilman suhteellinen kosteus on riippuvainen sekä lämpötilasta että absoluuttisesta kosteuspitoisuudesta.
- Huokoisen materiaalin lämmönjohtavuus on riippuvainen kosteuspitoisuudesta.
- Huokoisen materiaalin entalpia on kuivan materiaalin entalpian ja veden entalpian summa.
- Veden olomuodonmuutoksissa sitoutuu ja vapautuu energiaa latentin lämmön muodossa.

Lämmön- ja kosteudensiirron kytkeytyminen toisiinsa monimutkaistaa laskennallista tarkastelua, sillä materiaalien kosteuspitoisuus ja latentti lämpö täytyy sisällyttää lämmön tasapainoyhtälöön. Vastaavasti lämpötila vaikuttaa kosteuden tasapainoyhtälöön suhteellisen kosteuden muodossa. Tuloksena on kahden osittaisdifferentiaaliyhtälön yhtälöpari, jonka ratkaiseminen on mahdollista ainoastaan numeerisesti. (Künzel 1995.)

#### 3.4.2 Lämmön- ja kosteudensiirron osittaisdifferentiaaliyhtälöt

Aiemmin tässä luvussa esitelty rakenteiden lämpötekniiseen käyttäytymiseen liittyvät ilmiöt voidaan sijoittaa energiansäilymislakiin (kaava (31)). Tuloksena saadaan kaavan (33) mukainen osittaisdifferentiaaliyhtälö (SFS-EN 15026 2007).

$$\frac{\partial(H_m + H_w)}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q}_{cond} \pm S_h \quad (31)$$

$$(c_m \cdot \rho_m + c_w \cdot w) \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) - l_{lv} \nabla \cdot \vec{g}_v \quad (32)$$

$$(c_{p,m} \cdot \rho_m + c_{p,w} \cdot w) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T + l_{lv} \delta_p \nabla(\varphi p_{v,sat})) \quad (33)$$

missä  $H_m$  on kuivan materiaalin entalpia [J/m<sup>3</sup>]  
 $H_w$  on veden entalpia [J/m<sup>3</sup>]  
 $t$  on aika [s]  
 $\nabla \cdot \vec{q}_{cond}$  on johtumalla siirtyvän lämpövuon divergenssi [W/m<sup>3</sup>]  
 $S_h$  on lämmönlähde tai lämpönielu [W/m<sup>3</sup>]  
 $c_{p,m}$  on kuivan materiaalin ominaislämpökapasiteetti [J/(kg K)]  
 $\rho_m$  on kuivan materiaalin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]  
 $c_{p,w}$  on nestemäisen veden ominaislämpökapasiteetti [J/(kg K)]  
 $w$  on kosteuspitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]  
 $T$  on lämpötila [K/m]  
 $\lambda$  on lämmönjohtavuus [W/(m K)]  
 $l_{lv}$  on veden höyrystymislämpö [J/kg]  
 $\vec{g}_v$  on vesihöyryn massavuon tiheys [kg/(m<sup>2</sup> s)]  
 $\delta_p$  on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys [kg/(m s Pa)]  
 $\varphi$  on suhteellinen kosteus [-]  
 $p_{v,sat}$  on vesihöyryn kyllästyspaine [Pa]

Vastaavasti rakenteiden kosteusteknisen käyttäytymisen ilmiöt voidaan sijoittaa massan säilymislakiin kaavojen (34) ja (35) mukaisesti (Hens 2012, s. 268 – 269; Künzl 1995).

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{g}_l + \vec{g}_v) \quad (34)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi p_{v,sat})) \quad (35)$$

missä  $w$  on kosteuspitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]  
 $t$  on aika [s]  
 $\vec{g}_l$  on nestemäisen veden massavuon tiheys [kg/(m<sup>2</sup> s)]  
 $\vec{g}_v$  on vesihöyryn massavuon tiheys [kg/(m<sup>2</sup> s)]  
 $\varphi$  on suhteellinen kosteus [-]  
 $D_\varphi$  on kapillaarinen kosteudenjohtavuus [kg/(m s)]  
 $\nabla \varphi$  on suhteellisen kosteuden gradientti [1/m]  
 $\delta_p$  on vesihöyrynläpäisevyys [kg/(m s Pa)]  
 $p_{v,sat}$  on vesihöyryn kyllästyspaine [Pa]

Yhtälöt (33) ja (35) muodostavat yhtälöryhmän, jonka avulla voidaan ratkaista lämpötilan ja suhteellisen kosteuden jakauma rakenteessa valittuina ajanhetkinä. Yhtälöryhmää ei voida ratkaista analyttisesti, vaan ratkaisuun tarvitaan numeerisia menetelmiä.

Yhtälöt (33) ja (35) pätevät, jos seuraavat oletukset ovat voimassa (Künzel 1995; SFS-EN 15026 2007):

- Tarkasteltavat materiaalit ja ilma eivät ole liikkeessä.
- Systeemissä ei tapahdu konvektiovirtauksia.
- Tarkasteltava systeemi on vakioaineessa.
- Painovoimaista kosteudensiirtoa ei tarvitse huomioida.
- Tarkasteltavassa systeemissä ei tapahdu kemiallisia reaktioita.
- Tarkasteltavan systeemin tilavuus on vakio. Lämpölaajenemista ja kosteuspitoisuuden muutoksista aiheutuvaa kutistumista ja laajenemista ei oteta huomioon.
- Systeemin sisällä lämpötilaerot ovat pieniä, eikä säteilylämmönsiirtoa ja lämpötilagradientista aiheutuvaa diffuusiota tarvitse ottaa huomioon.
- Hygroskooppisen tasapainokosteuden lämpötilariippuvuutta ei huomioida.
- Päivittäinen keskilämpötila on alle 50 °C.
- Materiaaliominaisuudet eivät muutu vaurioitumisen tai ikääntymisen seurauksena.

Jos tarkasteltavassa systeemissä tapahtuu ilmapirtausta, tulee lämmön- ja kosteudensiirron osittaisdifferentiaaliyhtälöihin lisätä virtauksesta aiheutuva konvektiotermi kaavojen (36) ja (37) mukaisesti (COMSOL Multiphysics 5.3, s. 361 – 362; 513).

$$(c_{p,m}\rho_m + c_{p,w}w)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T + l_{lv}\delta_p \nabla(\varphi p_{v,sat})) - \rho_a c_{p,a} \vec{u} \cdot \nabla T \quad (36)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi p_{v,sat})) - \vec{u} \cdot \nabla (M_v \varphi c_{v,sat}) \quad (37)$$

missä

- $c_{p,m}$  on kuivan materiaalin ominaislämpökapasiteetti [J/(kg K)]
- $\rho_m$  on kuivan materiaalin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]
- $c_{p,w}$  on nestemäisen veden ominaislämpökapasiteetti [J/(kg K)]
- $w$  on kosteuspitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]
- $T$  on lämpötila
- $t$  on aika [s]
- $\lambda$  on lämmönjohtavuus [W/(m K)]
- $l_{lv}$  on veden höyrystymislämpö [J/kg]
- $\delta_p$  on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys [kg/(m s Pa)]
- $\varphi$  on suhteellinen kosteus [-]
- $p_{v,sat}$  on vesihöyryn kyllästyspaine [Pa]
- $\rho_a$  on ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>]
- $c_{p,a}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti [J/(kg K)]
- $\vec{u}$  on ilman virtausnopeus [m/s]
- $D_\varphi$  on kapillaarinen kosteudenjohtavuus [kg/(m s)]
- $M_v$  on vesihöyryn moolimassa [kg/mol]
- $c_{v,sat}$  vesihöyryn kyllästyskonsentraatio [mol/m<sup>3</sup>]

### 3.4.3 Lämmön- ja kosteudensiirron reunaehdot

Energia- ja massataseesta johdettujen osittaisdifferentiaaliyhtälöiden (kaavat (33) ja (35)) ratkaisemiseksi täytyy lisäksi määritellä reunaehdot systeemin rajapinnoilla. Reunaehdot muodostuvat sisä- ja ulkoilman olosuhteiden perusteella. Reunaehtoja on olemassa kolmenlaisia (Künzel 1995):

- 1) Pinnan lämpötila ja kosteus ovat yhtä suuret kuin ympäristön lämpötila ja kosteus. Rakennusten tapauksessa tämä pätee maahan tai veteen rajoittuville rakenteille.
- 2) Lämpövuoto ja massavuo pinnan läpi ovat vakioita. Tätä reunaehto voidaan soveltaa auringon säteilyyn tai sateeseen ulkopinnalla. Adiabaattinen pinta, eli pinta, jonka läpi ei siirry lämpöä, on tämän reunaehdon erikoistapaus. Vastaava erikoistapaus kosteudelle on vesitiivis pinta, jonka läpi ei siirry kosteutta.
- 3) Pinnalla on tietyn suuruinen vastus, joka aiheuttaa ympäristön ja pinnan välille lämpötilaeron ja suhteellisen kosteuden eron. Tämä on useimmin käytetty reunaehto ilmaan rajoittuville rakenteille. Tyypin 3 reunaehto kuvataan Newtonin jäähtymislaitilla (kaava (8)).

Jos ulkopuolinen pinta altistuu auringon säteilylle, voidaan lämpövuoto pinnan yli laskea standardin SFS-EN 15026 (2007) mukaisesti kaavoilla (38), (39) ja (40). Konvektion ja säteilyn lämmönsiirtokertoimet yhdistetään yhdeksi lämmönsiirtokertoimeksi  $h$  ja käytetään ulkoilman lämpötilan tilalla niin sanottua ekvivalenttia lämpötilaa  $T_{eq}$ , jolla otetaan huomioon auringon säteily ja säteilylämmönsiirto ympäröiviltä pinnoilta.

$$q_{sens} = h(T_{eq} - T_s) \quad (38)$$

$$h = h_c + h_r \quad (39)$$

$$T_{eq} = T_{out} + \frac{1}{h} (E_{sol}\alpha + (T_{surr} - T_{out})h_r) \quad (40)$$

missä  $q_{sens}$  on tuntuvan lämpövuon tiheys ympäristöstä pintaan [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $h$  on lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ]  
 $T_{eq}$  on ekvivalenttinen lämpötila [ $\text{K}$ ]  
 $T_s$  on pinnan lämpötila [ $\text{K}$ ]  
 $h_c$  on konvektiokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ]  
 $h_r$  on säteilyn lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ]  
 $T_{out}$  on ilman lämpötila [ $\text{K}$ ]  
 $E_{sol}$  on pinnalle tuleva auringon säteily [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $\alpha$  on absorptiokerroin [-]  
 $T_{surr}$  on ympäröivien pintojen lämpötila [ $\text{K}$ ]



Kosteudensiirron reunaehto muodostetaan vastaavalla tavalla. Ilmaan rajoittuvien rakennusosien tyypin 3 reunaehto on (Hens 2012, s. 204 – 206; COMSOL Multiphysics Heat Transfer Module User's Guide, s. 521):

$$g_v = \beta(p_{v,\infty} - p_{v,s}) \quad (41)$$

$$g_v = \beta(\varphi_\infty p_{v,sat}(T_\infty) - \varphi_s p_{v,sat}(T_s)) \quad (42)$$

$$\beta = 7,7 \cdot 10^{-9} \cdot h_c \quad (43)$$

missä  $g_v$  on kosteuden massavuon tiheys ympäristöstä pintaan [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ]  
 $\beta$  on pinnan diffuusiokerroin [ $\text{s/m}$ ]  
 $p_{v,s}$  on vesihöyryn osapaine pinnalla [ $\text{Pa}$ ]  
 $p_{v,\infty}$  on vesihöyryn osapaine riittävällä etäisyydellä pinnasta [ $\text{Pa}$ ]  
 $\varphi_\infty$  on ilman suhteellinen kosteus [-]  
 $p_{v,sat}(T_\infty)$  on vesihöyryn kyllästyspaine ilman lämpötilassa [ $\text{Pa}$ ]  
 $\varphi_s$  on pinnan suhteellinen kosteus [-]  
 $p_{v,sat}(T_s)$  on vesihöyryn kyllästyspaine pinnan lämpötilassa [ $\text{Pa}$ ]  
 $h_c$  on konvektiokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ]

Ulkopuolisilla pinnoilla täytyy lisäksi huomioida sadeveden kapillaarinen imeytyminen ja mahdolliset sadevesivuodot. Pystysuoria pintoja rasittavan viistosateen määrä riippuu sademäärästä, rakennuksen korkeudesta, tuuliolosuhteista ja ympäristöstä. Amerikkalaisessa ASHRAE-standardissa (ASHRAE 2009, s. 7) viistosade huomioidaan sekä ulkopinnalla että asettamalla arvio, että 1 % ulkopintaan osuvasta sateesta läpäisee rakenteen uloimmat osat. Sateen vaikutusta voidaan käsitellä laskennassa lähde-terminä.

## 4 Kirjallisuuskatsaus rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta

### 4.1 Eristepaksuuden vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen

Lämmöneristeen paksuuden kasvattaminen muuttaa vaipparakenteiden lämpötilajakaumaa. Eristekerroksen ulkopuoliset rakennekerrokset viilenevät, jolloin rakennusmateriaaleissa oleva huokosilma pystyy sitomaan vähemmän kosteutta ja kondensaation mahdollisuus on suurempi. (Vinha et al. 2008.) Tuuletetuissa rakenteissa, kuten tuuletetussa yläpohjassa, uloimpien rakennekerrosten olosuhteet muistuttavat lämmittämätöntä, ulkoilmalla tuuletettua ja sateelta suojassa olevaa ulkoarastoa. Näissä olosuhteissa puu homehtuu mutta ei lahoa. (VTT 2008.)

Paksuihin lämmöneristeisiin on keskustelussa suhtauduttu usein kriittisesti vedoten rakenteiden kuivumiskapasiteettiin (mm. Vinha et al. 2008; Vinha et al. 2013; Mölsä 2016). Lämpövuon vaipan läpi edistää rakenteen kuivumista tilanteissa, joissa siihen on kerääntynyt kosteutta sisäilman kosteuden, sateen tai vuodon seurauksena. Pienempi lämpövuon heikentää näin ollen rakenteiden vikaistoisuutta. Kuivumiskyvyn heikkeneminen aiheuttaa ongelmia erityisesti rakenteissa, joissa on herkästi homehtuvia materiaaleja, kuten puuta. (Lahdensivu et al. 2012, s. 10 – 11.)

VTT:n esimerkkilaskelmassa (2008, s. 9 – 10) kyseinen väite kyseenalaistetaan vertailemalla rakenteen ulkopinnan kuivumispotentiaalia käytettäessä joko 175 mm tai 345 mm paksuista eristettä. Laskelman mukaan kuivuminen on jokseenkin samanlaista riippumatta eristepaksuudesta.

Kuten kuivumiskapasiteettiin liittyvä näkemysero osoittaa, kysymys U-arvojen madaltamisen vaikutuksista rakennusten kosteustekniseen toimivuuteen on johtanut kahden koulukunnan syntymiseen: Teknologian tutkimuskeskus (VTT) edustaa keskustelussa hyväksyttävää linjaa ja Tampereen teknillinen yliopisto (TTY) kriittistä linjaa. Ohessa otteita VTT:n ja TTY:n julkaisuista ja Rakennuslehden julkaisemista haastatteluista:

*Rakenteiden kosteustekninen toimivuus ei aseta rajoituksia lämmöneristystason parantamiselle 30 % - 40 %:lla nykyisiin rakentamismääräyksiin (C3/2007) verrattuna. Useat rakenneosat soveltuvat matalaenergia-rakentamiseen sellaisinaan tai kohtuullisen pienin muutoksin. (VTT 2008.)*

*Uudisrakennusten tai niiden rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden ongelmat eivät aiheudu energiatehokkuuden parantamisesta. - - Energiatehokkuudesta tinkimällä ei päästä nykytasoa parempiin kosteusteknisiin ratkaisuihin missään rakennusosassa. (Ojanen et al. 2016.)*

*Riippumatta rakenteiden energiatehokkuudesta tai rakennetyypistä mikä tahansa rakenne voi vaurioitua liiallisen kosteuden vaikutuksesta. Mikään lämpöhäviö ei ole riittävä varmistamaan rakenteen kuivumisen esimerkiksi satunnaisen veden tunkeutumisen jälkeen. (Ojanen et al. 2016.)*

*Ilmastonmuutos ja lämmöneristysten lisäys lisäävät useiden nykyisten vaipparakenteiden kosteusriskejä ja edellyttävät niissä toteutustapojen muutoksia (Mölsä 2016).*

*Yleisesti ottaen vaipparakenteiden kosteustekninen toiminta heikkenee, kun rakenteiden lämmöneristystä lisätään (Vinha et al. 2008).*

*[VTT:n] raportissa esitetyillä yksittäisten koerakennusten ja rakenteiden kenttätutkimuksilla ei voida todistaa, että kaikki vaipparakenteet toimivat moitteettomasti lämmöneristystä lisättäessä (Mölsä 2016).*

VTT ja TTY päätyvät erilaisiin johtopäätöksiin, vaikka tutkimustulokset ovat samankaltaisia (VTT 2008; Ojanen et al. 2016; Vinha et al. 2008; Vinha et al. 2013). Merkittävimmät syyt tähän ovat eroavaisuudet kysymyksenasettelussa ja yleistysten tekeminen saaduista tuloksista. VTT:n lähtökohta on, että uudisrakentamisessa käytetään kosteusteknisesti turvallisia rakenteita, ja tutkimuksen tavoitteena on osoittaa, etteivät riskit lisäänty näissä rakenteissa matalampien U-arvojen vaikutuksesta. TTY puolestaan tuo esille, mitkä nykyisin käytössä olevat rakenteet ovat riskialttiita eristepaksuuden kasvaessa. Asetelma käy ilmi edellä olevista sitaateista.

Kosteusteknistä toimivuutta täytyy aina tarkastella rakenteittain. Molemmat tutkimuslaitokset ovat yhtä mieltä siitä, että muun muassa tässä tutkimuksessa käsiteltävät rakenteet eli betonisandwich-ulkoseinä, kevytsorakatto ja maanvastainen alapohja ovat toimivia rakenteita nykyisillä (D3/2012) U-arvoilla toteutettuna, vaikkakin eristepaksuuden kasvattaminen saattaa aiheuttaa joitakin muutoksia toteutuksessa. Sekä VTT että TTY pitävät sisäpuolelta eristettyjä rakenteita ja tuulettumatonta eristerapattua seinää riskialttiina ja erityisen tarkkaa suunnittelua vaativina rakenteina. (VTT 2008; Vinha et al. 2013; Lahdensivu et al. 2012, s. 9.)

Kiistanalaisia ovat pientaloissa yleiset rakenteet tuulettuva yläpohja ja ryömintätilainen alapohja. Näissä rakenteissa uloimmissa osissa homeen kasvulle suotuisat olosuhteet lisääntyvät matalan U-arvon vaikutuksesta. TTY pitää tätä riskinä. VTT:n näkemys on, että Suomen olosuhteissa homeen kasvua uloimmissa rakennekerroksissa tapahtuu lähes aina ja oleellista on varmistaa, että rakenteet ovat ilmatiiviitä eikä haitallisia aineita siirry sisäilmaan. (Vinha et al. 2008; VTT 2008.)

Myös rankarakeinteisen ulkoseinän toimivuus on kiistanalaista. VTT:n (2008) mukaan matala U-arvo ei lisää homehtumisriskiä. Vinha et al. (2013, s. 330 – 331) pitävät erityisesti tiiliverhottua rankarakenteista seinää riskialttiina, koska tiiliverhous päästää lävitseen enemmän viistosadetta kuin puuverhous.

Tutkimuksista TTY:n tutkimukset (Vinha et al. 2008; Vinha et al. 2013) ovat sisällöltään huomattavasti laajempia ja yksityiskohtaisempia. Tarkasteluja on tehty kattavasti erilaisille rakenteille. Rakennusfysiikan lisäksi aihetta käsitellään energiasäästöpotentiaalin, taloudellisen kannattavuuden ja teknisen toteutettavuuden näkökulmista. TTY:n asiantuntijat kantavat huolta muutoksen nopeasta aikataulusta ja alan toimijoiden riittävästä osaamisesta.

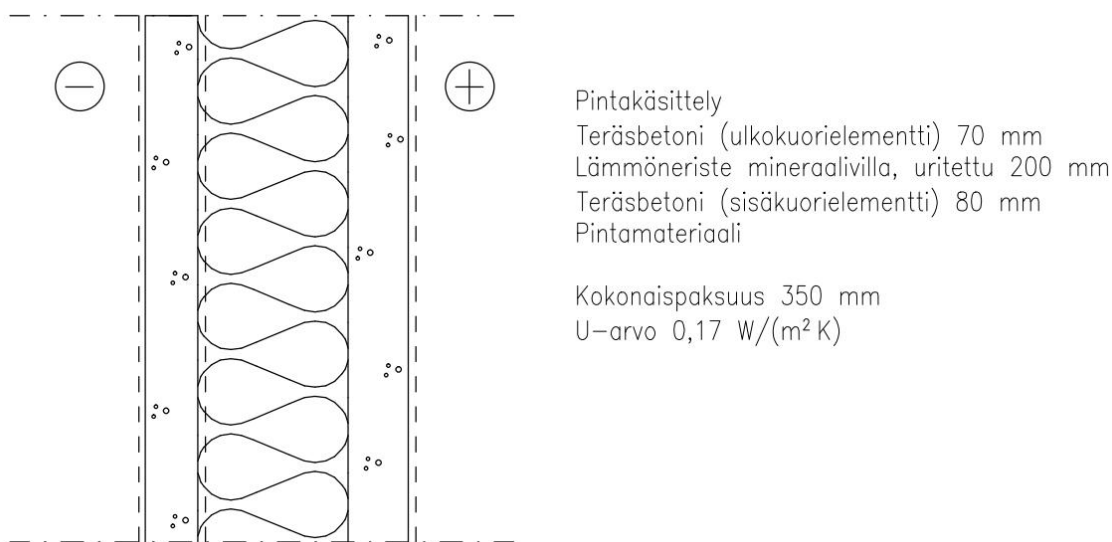
Merkittäviä eroja aiheuttaa myös ilmastonmuutos, joka on huomioitu TTY:n tutkimuksissa (Vinha et al. 2008; Vinha et al. 2013) mutta jota ei huomioida VTT:n tutkimuksissa (VTT 2008; Ojanen et al. 2016). Ilmastonmuutoksen myötä viistosateet ja pilvisuus lisääntyvät ja lämpötila- ja kosteusolosuhteet muuttuvat homeen kasvulle suotuisammiksi. TTY:n raporteissa U-arvon madaltamisen ja ilmastonmuutoksen negatiiviset vaikutukset ilmaistaan usein samassa lauseessa (vrt. neljäs sitaatti edellä). Vinha et al. (2013, s. 332) kuitenkin kirjoittavat, että ilmastonmuutoksen merkitys on näistä suurempi. VTT:n näkemys on, että ilmastonmuutoksen aiheuttamat riskit ovat samanlaiset riippumatta rakennuksen lämmöneristystasosta (VTT 2008, s. 12).

Samaa mieltä molemmat tahot ovat siitä, että asiantuntevan suunnittelun ja rakentamisen laadun merkitys korostuu. Koska kosteustekninen toimivuus pitää aina varmistaa rakenteittain, vaaditaan suunnittelijoilta riittävää osaamista. Rakennusaikainen kosteudenhallinta ja toteutuksen huolellisuus korostuvat. (VTT 2008; Vinha et al. 2008.)

Suomessa TTY:n ja VTT:n julkaisujen lisäksi aiheeseen on otettu kantaa muun muassa Rakenteellinen energiatehokkuus -Oppaassa (Lylykangas et al. 2016). Oppaassa esitellään useita toimivia rakennetyyppejä. Kosteustekninen toimivuus on varmistettu laskennallisesti, ja lisäksi esitellään useita toteutettuja kohteita, joista on positiivisia kokemuksia. Muissa Pohjoismaissa tutkimusta on tehty erityisesti tuulettuvasta yläpohjasta ja ryömintätilaisesta alapohjasta, joiden toimivuus on kiistanalaista.

## 4.2 Betonisandwich-ulkoseinä

Tässä työssä tarkasteltava ulkoseinä rakenne on betonisandwich-rakenne, jossa lämmöneristeenä on uritettu mineraalivilla. Rakennetyyppi on esitetty kuvassa 9.

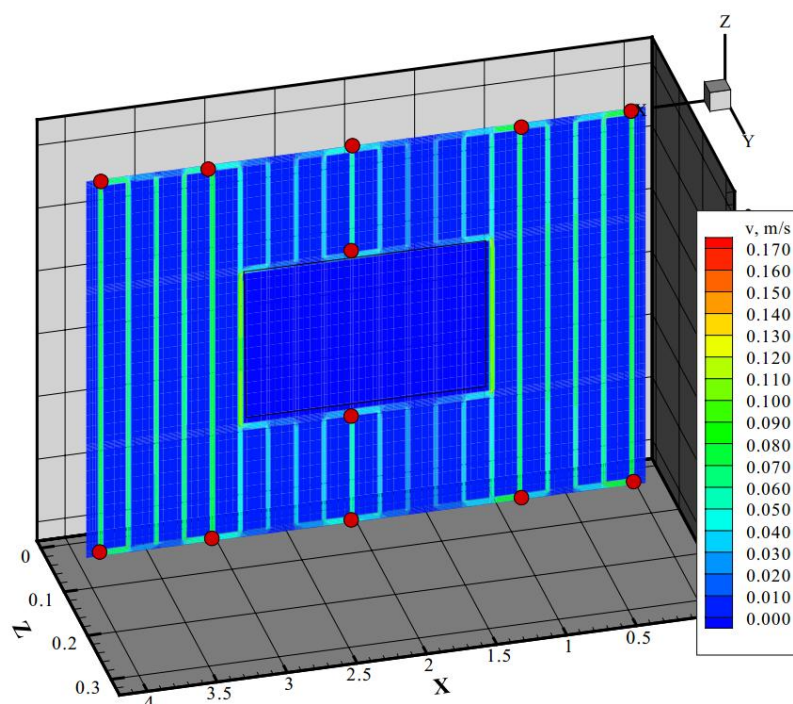


Kuva 9. Betonisandwich-ulkoseinän rakennetyyppi.

Tärkeimmät betonisandwich-ulkoseinää kuormittavat kosteusrasitukset ovat viistosade, sisäilman kosteus ja betonin alkukosteus. Materiaaleista betoni on hygroskooppinen ja kapillaarinen materiaali, jolla on korkea vesihöyrynvastus. Mineraalivilla puolestaan on diffuusioavoin materiaali, joka ei sido kosteutta hygroskooppisesti eikä kapillaarisesti. Kumpikaan materiaali ei ole herkkä homehtumiselle (Vinha 2014, s. 61).

Kylmässä ilmastossa kosteus kerääntyy rakenteessa potentiaalisesti uloimman betonikuoren ja lämmöneristeen rajapintaan. Rajapinnan tuulettaminen urituksen ja tuuletusputkien avulla parantaa rakenteen kuivumiskykyä, ja urituksesta onkin tullut käytäntö. Tuuletus poistaa betonin alkukosteutta ja aukoista tai saumoista tunkeutuvaa sadevettä, mutta ei riitä poistamaan merkittävien vesivuotojen aiheuttamia kosteusmääriä. (VTT 2009.)

Uritus jakaa tuuletusvirtauksen laajalle alueelle seinäelementissä (kuva 10). Tuuletusurien koko on esimerkiksi 30 mm x 30 mm ja ne sijaitsevat 210 mm välein. Urien välisestä alueesta kosteus siirtyy uriin diffuusiolla, sillä mineraalivillan vesihöyrynvastus on hyvin alhainen. Näin ollen mineraalivillalla eristetyin betonisandwich-rakenteen kosteustaso on samaa luokkaa riippumatta siitä, tuuletetaanko rakennetta tuuletusurien vai yhtenäisen tuuletusvälin kautta. (Salonvaara & Nieminen 2003.)



*Kuva 10. Ilmavirtausnopeudet tuuletusurissa. Tulo- ja poistoputket (kuvassa merkitty punaisella) sijaitsevat seinäelementin ala- ja yläreunassa 1 m:n välein ja ikkunan ala- ja yläpuolella on lisäksi yksi putki. (Salonvaara & Nieminen 2003, s. 28.)*

Tuuletusurien sijainti ja detaljiratkaisut täytyy suunnitella siten, että seinä kuivuu tasaisesti kaikkialta. Rakenne kuivuu tasaisemmin, jos tuuletusaukkoja on joka kerrosvälissä. Käytettäessä koko seinän korkuisia yhtenäisiä tuuletusuria kyllästyy tuuletusilma ensimmäisten metrien matkalla eikä pysty sitomaan kosteutta poistumisaukon lähetyvillä. Myös ikkunoiden tai muiden tuuletusurat katkaisevien rakennusosien ylä- ja alareunaan tulee sijoittaa tuuletusputkia, jotta niiden ympärille ei muodostu katvealueita. (Salonvaara & Nieminen 2003.)

Salonvaaran ja Niemisen (2003) tutkimuksen mukaan ilman virtausnopeus tuuletusurissa on nykyisillä suunnitteluratkaisuihin yleensä alle 0,1 m/s (kuva 10). Tämä nopeus riittää poistamaan kosteutta kesäaikana kolmessa viikossa 1 kg neliometriä kohti. Tutkimuksessa todetaan, ettei ilman virtausnopeutta ole tarpeellista yrittää kasvattaa, koska betonin

kuivumista rajoittaa ennen kaikkea kosteuden siirtyminen betonin sisällä. Kastunut mineraalivilla puolestaan kuivuu tehokkaasti myös pienillä ilmamäärillä. Lisäksi jos virtausnopeus on yli 0,5 m/s, on tuuletuksella merkittävä U-arvoa heikentävä vaikutus. Kun virtausnopeus on alle 0,1 m/s, kasvaa lämpövuoto rakenteen läpi kasvaa alle prosentin verrattuna tuulettamattomaan tuuletusraolliseen rakenteeseen (Salonvaara & Nieminen 2003, s. 57).

Betonissa on valun jäljeltä merkittäviä määriä kosteutta, joka kuivuu ensimmäisten vuosien aikana ulko- ja sisäpintojen läpi sekä tuuletusurien kautta. Kun eristeenä on mineraalivilla, edistää uritus myös sisäkuoren rakennekosteuden kuivumista. Jos eristeenä käytetään solumuovieristettä, pääsee sisäkuori kuivumaan vain sisäpinnan kautta rakennuksen sisälle. (VTT 2009.)

Myös julkisivun pintamateriaali vaikuttaa rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Paljas betonipinta imee sadevettä kapillaarisesti. Kapillaarisen siirtymisen estävä maalipinta voi siten pienentää viistosateesta aiheutuvaa kosteusrasitusta. Maalin vesihöyrynvastus vastaa maalista riippuen 1 – 15 mm paksuisen betonikerroksen vesihöyrynvastusta, joten se ei merkittävästi hidasta kosteuden siirtymistä diffuusiolla. Jos julkisivumateriaalina käytetään vesihöyryä läpäisemätöntä materiaalia, kuten klinkkeriä, täytyy rakenne aina tuulettaa. (Salonvaara & Nieminen 2003.)

Paksun lämmöneristeen vaikutusta betonisandwich-elementin kosteustekniseen toimintaan ovat tarkastelleet laskennallisesti muun muassa Vinha et al. (2013, s. 148 – 157) FRAME-hankkeessa ja Lylykangas et al. (2016, s. 203) osana Rakenteellinen energiatehokkuus -Opasta. Lylykangas et al. tarkastelivat rakennetta WUFI®-ohjelmalla viiden vuoden aikana alkaen rakentamisesta. Mineraalivillan paksuus rakenteessa oli 260 mm. Rakenne osoitettiin toimivaksi, sillä homeindeksin arvo pysyi koko tarkastelujakson ajan arvossa 0.

Vinhan et al. (2013, s. 148 – 157) laskelmissa käytettiin useaa eri eristepaksuutta: 160, 240, 270 ja 450 mm. Tarkastelu tehtiin sekä nykyilmastolle että ennustetulle vuoden 2100 ilmastolle. Tulosten mukaan suhteellinen kosteus pysyi lämmöneristeen ulkopinnassa yli kondenssirajan 2,5 vuotta kuivumisen alkuhetkestä ja ylimääräinen kosteus poistui rakenteesta neljän vuoden aikana. Kosteuden kondensoitumista esiintyi talvisin myös rakennekosteuden kuivuttua. Tulosten mukaan eristepaksuuden kasvattamisella ei ole suurta vaikutusta rakenteen kokonaiskuivumisaikaan.

Homeindeksi sai kyseisissä laskelmissa arvon 1,1 ajanjaksona 1,5 – 4 vuotta laskennan alkuhetkestä. Tämän jälkeen homeindeksin arvo kääntyi laskuun, koska ylimääräinen rakennekosteus kuivui rakenteesta. Tutkimuksessa todetaan, että vaikka lämmöneristepaksuuden kasvattaminen johtaa korkeampaan suhteelliseen kosteuteen eristeen ulkopinnassa, se ei lisää homeen kasvulle otollisia olosuhteita, koska lämpötila on matalampi ja lisäksi alkalinen betoni suojaa rakennetta homehtumiselta. Homehtumisen riski kasvaa kuitenkin ilmastonmuutoksen myötä, sillä vuoden 2100 ilmaston ennustetaan olevan lämpimämpi ja kosteampi kuin nykyilmasto. (Vinha et al. 2013, s. 148 – 157.)

Lehtinen et al. (1997) tutkivat betonisandwich-elementin toimintaa laskennallisten tarkastelujen lisäksi myös kenttä- ja laboratoriokokeilla. Kenttämittaukset tehtiin Helsingissä vuonna 1996 rakennettuun kerrostaloon heti rakentamista seuraavana vuonna. Tutkimuksessa kävi ilmi, että merkittävä osa tuuletusuriin johtavista tuuletusaukoista oli

tukossa. Syitä tukkeutumiselle oli useita: Ikkunan piilien tuuletusputkiin oli joutunut valuvaiheessa betonia. Yläpohjan lämmöneristeeseen johtavat raot olivat tukossa polyuretaanivaahdosta, jota oli käytetty yläpohjan kuorielementin ja ylimmän seinäelementin välisessä saumassa. Elementtien saumoissa tuuletusputken päät olivat työntyneet mineraalivillakaistaan asti niin ettei ilma päässyt virtaamaan. Lisäksi ilmavirtausta heikensi uriinjyrsinnässä jäänyt villahahtuva sekä mineraalivillan painuma. Kenttäkokeet osoittivat näin ollen tuuletusjärjestelmässä olevan merkittäviä rakennusaikaisten virheiden riskejä.

Tutkitut mittauspisteet kuivuivat hygroskooppiselle alueelle ensimmäisenä kesänä, mutta seuraavana syksynä kosteuspitoisuus nousi jälleen kapillaariselle alueelle. Mittausten perusteella alkukosteuden kuivuminen oli nopeinta ikkunallisissa seinäelementeissä. Tulos selittyi seuraavilla huomioilla:

- Ikkunallisessa elementissä on vähemmän betonia ja siten vähemmän alkukosteutta.
- Tuuletusaukkojen määrä on suurin, koska aukkoja on myös ikkunan ylä- ja alareunoissa.
- Tuuletusilman virtausmatkat ovat lyhyempiä.
- Hyvin kuivuneissa elementeissä oli vähemmän tukkeutuneita tuuletusputkia kuin muissa elementeissä. (Lehtinen et al. 1997.)

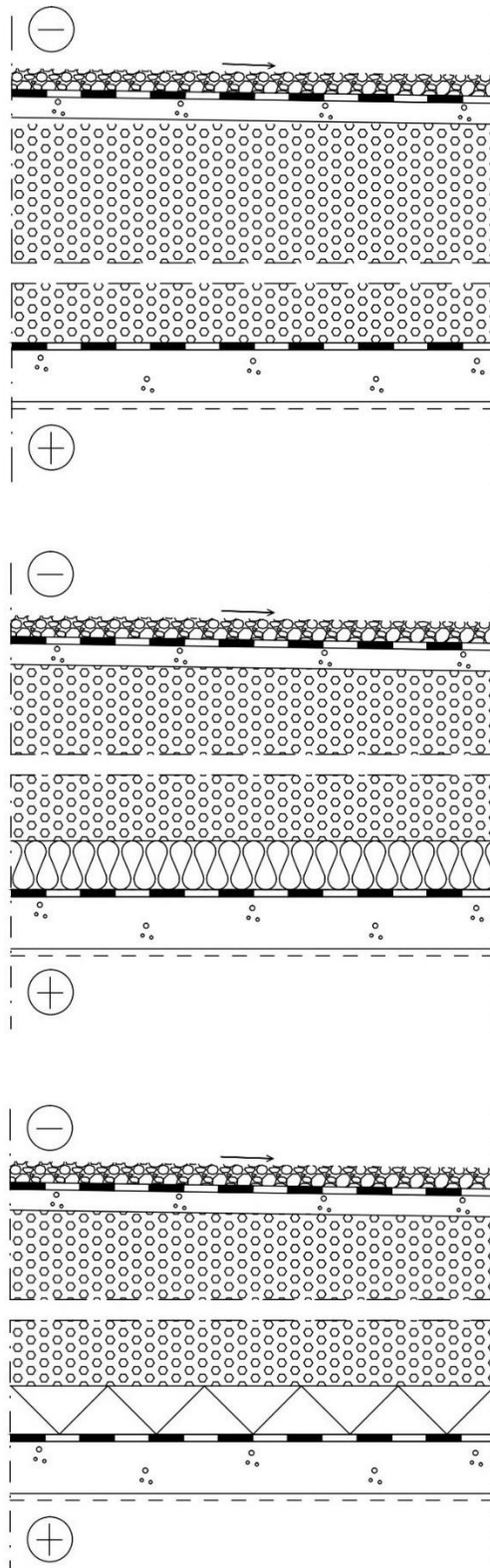
Tulosten perusteella voidaan sanoa, että tuuletus tehostaa sandwich-rakenteen kuivumista. Kriittisintä tuuletuksen toimivuus on suurissa ikkunattomissa elementeissä, joissa kuivattava yhtenäinen ala on suurin. Tutkimuksen johtopäätöksenä oli, että yhden vuoden mittausaika oli liian lyhyt alkukosteuden kuivumisen tutkimiseen. (Lehtinen et al. 1997.)

Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta uritetulla mineraalivillalla eristetyn betonisandwich-ulkoseinän olevan kosteusteknisesti toimiva rakenne. Tuuletus mahdollistaa alkukosteuden ja satunnaisten pienten vuotojen kuivumisen rakenteesta. Uritettu rakenne kuivuu yhtä tehokkaasti kuin yhtenäisellä tuuletusraolla tuuletettu rakenne. Huomiota on erityisesti kiinnitettävä tuuletusjärjestelmän toteutukseen niin etteivät tuuletusputket ja urat tukkiudu.

### 4.3 Kevytsorakatto

Tässä työssä tarkasteltava yläpohjarakenne on niin sanottu kevytsorakatto. Kevytsorakatto voidaan toteuttaa käyttämällä lämmöneristeinä pelkkää kevytsoraa, jolloin määräystason mukaisen  $U$ -arvon  $0,09 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  saavuttamiseksi tarvitaan 1000 mm paksuinen eristekerros. Vaihtoehtoisesti osa kevytsorasta voidaan korvata EPS-eristeellä tai kuormitusta kestäväällä mineraalivillaeristeellä, jolloin yläpohjasta käytetään nimitystä lisäeristetty kevytsorakatto. Lisäeristetyn kevytsorakaton eristeiden yhteispaksuus on noin 700 mm, eli tehokkaamman lämmöneristeiden käyttö pienentää rakenteen kokonaispaksuutta noin 300 mm. (Weber 2016.) Vaihtoehtoiset rakennetyypit on esitetty kuvassa 11.

Kevytsorakaton kosteustekninen toiminta perustuu koko kevytsorakerroksen kattavaan tuuletukseen, joka toteutetaan useimmiten räystäältä (kuva 12). Varsinaista tuuletusväliä ei tarvita, koska rakeinen kevytsora läpäisee hyvin ilmaa ja ilma virtaa siten koko kevytsorakerroksen korkeudella. Yläpuolinen bitumikermikate estää sadeveden pääsyn eristekerrokseen ja kantavan laatan päällä oleva höyrynsulku pienentää sisäilmasta siirtyvää kosteusvirtaa. (Vahanen Oy 2012a.)



Suojakiveys > 30 mm  
 Bitumikermi  
 Katelaatta 60 mm, kallistus > 1:80  
 Kevytsora, keskipaksuus 1000 mm  
 Höyrynsulku  
 Kantava betonirakenne  
 Pintakäsittely

Kokonaispaksuus 1400 mm  
 U-arvo 0,09 W/(m<sup>2</sup> K)

Suojakiveys > 30 mm  
 Bitumikermi  
 Katelaatta 60 mm, kallistus > 1:80  
 Kevytsora, keskipaksuus 500 mm  
 Mineraalivilla 200 mm  
 Höyrynsulku  
 Kantava betonirakenne  
 Pintakäsittely

Kokonaispaksuus 1100 mm  
 U-arvo 0,09 W/(m<sup>2</sup> K)

Suojakiveys > 30 mm  
 Bitumikermi  
 Katelaatta 60 mm, kallistus > 1:80  
 Kevytsora, keskipaksuus 450 mm  
 EPS 200 mm  
 Höyrynsulku  
 Kantava betonirakenne  
 Pintakäsittely

Kokonaispaksuus 1050 mm  
 U-arvo 0,09 W/(m<sup>2</sup> K)

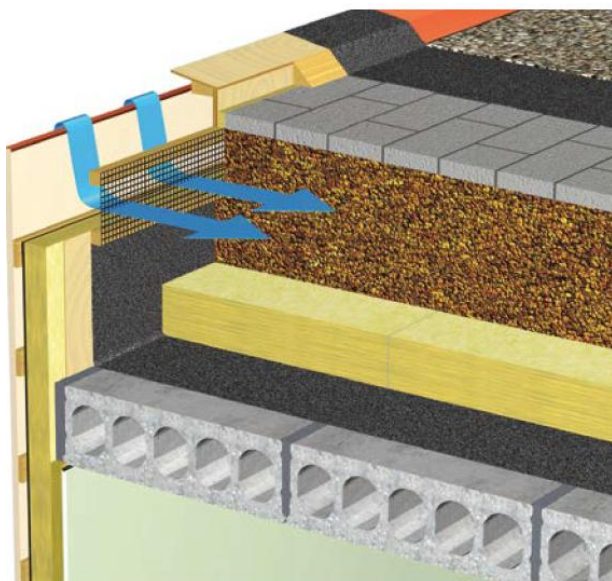
*Kuva 11. Kevytsorakaton vaihtoehtoiset rakennetyypit.  
 (Weber 2016; RT 83-11010 2010.)*

Merkittävin kattoon kohdistuva käytönaikainen kosteuskuorma on sade. Pienikin katevaurio voi päästää kattoon merkittäviä määriä kosteutta. Vahnen Oy:n (2012b) tekemän



esimerkkilaskelman mukaan pienestä, terävän esineen aiheuttamasta katevauriosta voi siirtyä kattoon sateiden vaikutuksesta yli 20 kg vettä vuodessa.

Toinen merkittävä kosteuskuorma on rakennusaikainen kosteus. Leca Kevytsorakattojen suunnitteluohjeiden (Weber 2016, s. 12) mukaan rakennuskosteuden määrä on  $13 \text{ kg/m}^2$ , josta  $11 \text{ kg/m}^2$  on rakennusmateriaaleihin sitoutunutta kosteutta ja  $2 \text{ kg/m}^2$  on työnaikaisesta sateesta aiheutuvaa kosteutta. Rakennuskosteuden määrää voidaan pienentää suorittamalla asennustyö sääsuojan alla. Kantavan betonilaatan kosteus kuivuu höyrynsulun vaikutuksesta sisäänpäin, eikä se vaikuta katon eristetilan kosteuskuormitukseen.



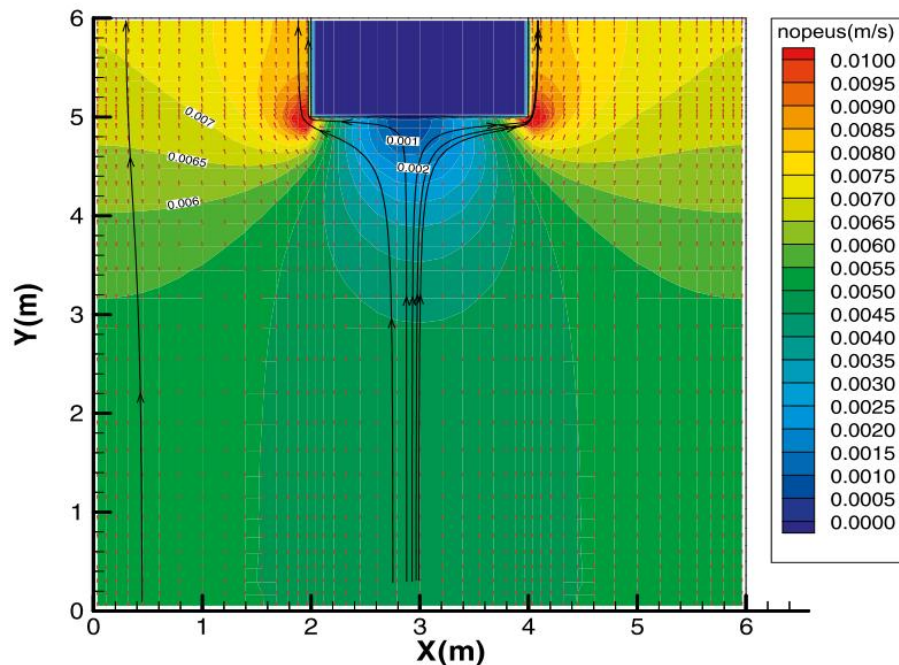
*Kuva 12. Mineraalivillalla lisäeristetyin kevytsorakaton tuulettuminen räystään kautta. (Weber 2016.)*

Lisäksi myös ulkoilman kosteus saattaa lisätä katon kosteusrasitusta, sillä tietyissä sääolosuhteissa tuuletusilmassa oleva kosteus saattaa kondensoitua katossa katemateriaalin alapintaan. Ilmiön merkitys on pitkällä aikavälillä pieni, koska tuuletus pystyy poistamaan kosteuden. Sisäilman kosteus puolestaan rasittaa kattoa hyvin vähissä määrin, koska höyrynsulku pitää kosteusvirran pienenä. Rakenteen ilmatiiviyteen tulee kiinnittää huomioita, jotta myös betonielementtien saumoissa ja läpivienneissä pystytään estämään kosteuden siirtyminen sisäilmasta ilmapuotojen mukana. (Vahanen Oy 2012a.)

Kosteus siirtyy rakenteen eri kerroksissa usean eri kosteudensiirtomekanismin vaikutuksesta: Tuuletusilmavirta poistaa kosteutta kevytsorakerroksesta konvektion avulla. EPS- tai mineraalivillaeristeessä kosteus siirtyy diffuusiolla. Vuodon tai kondensaation tapauksessa nestemäinen vesi valuu painovoiman vaikutuksesta höyrynsulun päälle, missä se jakautuu vaakasuoralla alustalla vuotokohtaa laajemmalle pinta-alalle. (Vahanen Oy 2012a.)

Kevytsorakatto tuulettuu räystäiden kautta tuulen aiheuttamien paine-erojen vaikutuksesta. Tuuletussuunnaksi valitaan suunta, jossa räystäiden välimatka on lyhin. Räystäiden etäisyydestä käytetään nimitystä tuuletuspituus. Kuvassa 13 on esitetty esimerkki tuuletusilman virtauskentästä katossa. Kuvasta voidaan arvioida keskimääräiseksi virtausnopeudeksi  $0,005 \text{ m/s}$ . (Weber 2016.)

Tuuletusta joudutaan tehostamaan alipaineventtiileillä tai koneellisella tuuletuksella, jos katon koko ja muoto, kevytsorakerroksessa olevat esteet tai katon sijainti suojaisella paikalla aiheuttavat epävarmuutta räystäiden kautta tapahtuvan tuuletuksen riittävydestä. Tuuletusta suunniteltaessa tulee tunnistaa mahdolliset katvealueet ja asentaa niihin alipaineventtiilejä. (Weber 2016.) Voimakas tuuletus eristekerroksen lisää lämpöhäviötä (Lahdensivu et al. 2012, s. 73), joten tuuletus tulee suunnitella tarvetta vastaavaksi.



Kuva 13. Esimerkki kevytsorakaton tuuletuksen virtauskentästä. Kuvan yläosassa olevan seinämän eteen muodostuu katvealue. (Weber 2016, s. 14.)

Vaikka virtausnopeus on vaatimaton, riittää ilmvirta poistamaan katosta rakennekosteuden ja käytön aikaiset kosteuskuormat. Koska kevytsora läpäisee hyvin ilmaa, tapahtuu ilmvirtaus koko eristekerroksessa, mikä edistää kosteuden poistumista. Ilmvirtausta ei kuitenkaan tapahdu EPS- tai mineraalivillaeristeessä, joten näiden materiaalien läpi kosteus siirtyy diffuusiolla. (Vahanen Oy 2012a.)

Kevytsorakerroksessa on tyypillisesti ilmanvaihtokanavia ja muita asennuksia (kuva 14). Kuten edellä mainittiin, asennukset heikentävät tuuletusilmavirtaa ja aiheuttavat katve-alueita. Lisäksi kanavien pintaan saattaa kondensoitua kosteutta, mikä täytyy estää päälystämällä kanavat lämmöneristeellä (Lahdensivu et al. 2012, s. 73).

Kosteusteknisesti rakenteen kriittisin kohta on höyrynsulun ja lämmöneristeen rajapinta, johon nestemäinen vesi valuu katossa painovoiman vaikutuksesta. Perinteisessä rakenteessa, jossa eristeenä oli pelkkää kevytsoraa ja eristekerroksen paksuus oli nykyistä pienempi, katon kuivuminen oli varmempaa. Kyseisestä rakenteesta on myös paljon kokemuseräistä tietoa, sillä rakenne on ollut käytössä jo yli 50 vuotta (Weber 2016).

Nykyisellä U-arvolla  $0,09 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$  tai varsinkin tavoitellessa matalaenergiatasoa ei pelkän kevytsoran käyttö ole enää mielekäästä (Lahdensivu et al. 2012, s. 71 – 73). Rakenteen lisäeristäminen solumuovieristeellä tai mineraalivillalla heikentää katon kosteusteknistä

toimintaa kahdella tavalla: Ensinnäkin kevytsoran lämpötila laskee, jolloin kevytsorakerroksessa oleva ilma pystyy sitomaan ja kuljettamaan pois pienempiä määriä kosteutta. Toiseksi tuulettuminen ei ulotu höyrynsulkuun asti, vaan kosteus siirtyy lisäeristeen läpi diffuusiolla. (Vahanen Oy 2012a.)



*Kuva 14. Kattokaivo ja ilmastointiputkia katolla ennen kevytsoran asennusta. (Weber 2016.)*

Muutoksen vaikutusta arvioitiin laskennallisesti konsulttitoimisto Vahasen (2012a; 2012b) tekemässä toimeksiannossa. Tulokset on koottu taulukkoon 6. Kosteudensiirto konvektiolla heikkenee lisäeristysten vaikutuksesta 39 %, koska kevytsorakerroksen lämpötila laskee. Muutoksen prosentuaalinen suuruus on yhtä suuri riippumatta tuuletuspituudesta ja siitä, onko lisäeristemateriaali EPS vai mineraalivilla.

Erityisen merkillepantavaa on, että EPS-eristeen suuri vesihöyrynvastus rajoittaa kuivumista merkittävästi, sillä EPS:llä lisäeristetyn katon kuivumiskapasiteetti on vain 1 (kg/(m<sup>2</sup> a)). Mineraalivillan tapauksessa kosteudensiirto diffuusiolla rajoittaa kuivumista vain käytettäessä lyhintä 10 metrin tuuletuspituutta. Diffuusiolla siirtyvän kosteuden määrälle on saatu vaihtelevia arvoja, koska laskenta tehtiin käyttäen useita eri reunaehtoja. (Vahanen Oy 2012a.)

Rakenteen toimivuuden arvioimiseksi on lisäksi syytä tarkastella materiaalien kosteudenkestävyyttä ja mikrobivaurion todennäköisyyttä. Pääasiassa kevytsorakaton materiaalit kestävät kosteusrasituksia kokematta vaurioita tai muodonmuutoksia. Poikkeuksena ovat kevytsorakerroksessa olevat puupohjaiset materiaalit, joita käytetään muun muassa kattokaivojen, räystäiden ja läpivientien yhteydessä (kuva 14).

Mikrobivaurion syntymiseksi tarvitaan kosteuden lisäksi ravinteita. Homekasvu on mahdollista höyrynsulun ja EPS-eristeen rajapinnassa, jos höyrynsulun päälle on jäänyt orgaanista materiaalia, kuten esimerkiksi sahanpurua puuosien rakentamisen seurauksena. Mineraalivillaa käytettäessä rakenne kuivuu nopeammin eikä mikrobikasvu ole todennäköistä. Katon mikrobikasvu muodostuu ongelmaksi, jos eristetilan ja sisäilman välillä on ilmayhteys, jota pitkin epäpuhtauksia kulkeutuu sisäilmaan. (Vahanen Oy 2012b.)

*Taulukko 6. Kevytsorakaton kuivumiskapasiteetti eri eristemateriaaliyhdistelmillä. (Vahanen Oy 2012a.)*

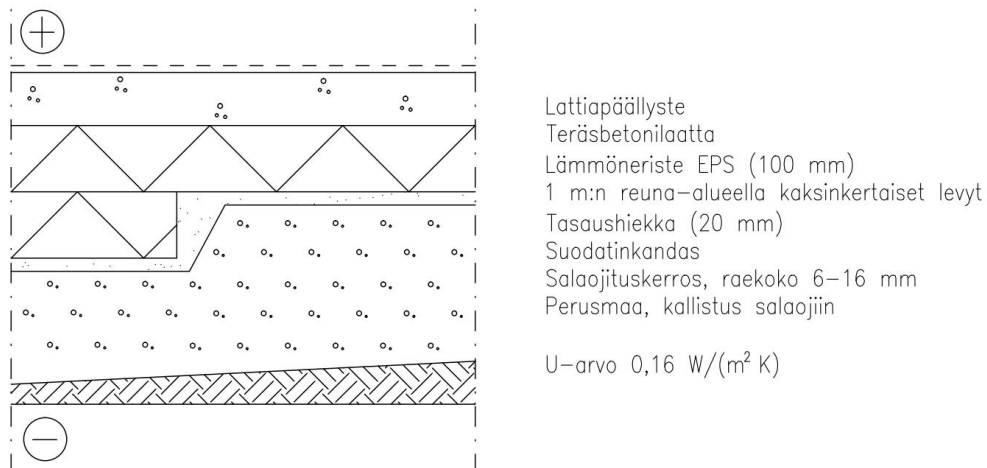
	Kevytsora	Kevytsora ja EPS	Kevytsora ja mineraalivilla
Diffuusio ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ a})$ )	-	0,8 – 1,3	6,9 – 9,9
Kosteudensiirto konvektiolla ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ a})$ )			
Tuuletuspituus (m)			
10	26,5	16,2	16,2
20	13,2	8,1	8,1
35	7,6	4,6	4,6
Kuivumiskapasiteetti ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ a})$ )			
Tuuletuspituus (m)			
10	26,5	noin 1	noin 8
20	13,2	noin 1	noin 8
35	7,6	noin 1	noin 4,6

Aikaisemman tutkimuksen (Vahanen Oy 2012a; b) ja kokemusperäisen tiedon (Weber 2016) perusteella voidaan sanoa, että pelkällä kevytsoralla eristetty katto on kosteusteknisesti toimiva rakenne ja pienetkin tuuletusilman virtausnopeudet riittävät poistamaan normaalit käytönaikaisen kosteuskuormat ja rakennuskosteuden. Lisäeristäminen mineraalivillalla on myös kosteusteknisesti turvallista, vaikka kuivumiskapasiteetti pienenee pelkällä kevytsoralla eristettyyn kattoon verrattuna. Mineraalivillan alhainen vesihöyrynvastus mahdollistaa höyrynsulun päällä olevan kosteuden siirtymisen diffuusiolla kevytsorakerrokseen, josta se poistuu tuuletusilman mukana. Verrattuna uratuuletetulla mineraalivillalla tai solumuovieristeellä eristettyyn kattoon, joiden kuivumiskapasiteetti on 1,5 ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ a})$ ), on mineraalivillalla lisäeristetyn kevytsorakaton kuivumiskapasiteetti noin viisinkertainen. (Vahanen Oy 2012a.)

EPS:llä lisäeristettyä kevytsorakattoa ei sen sijaan voida pitää kosteusteknisesti riskittömänä, sillä jos eristeen ja höyrynsulun väliin pääsee kosteutta esimerkiksi sadevesivuodon seurauksena, se poistuu sieltä erittäin hitaasti. Ero mineraalivillalla lisäeristettyyn kevytsorakattoon johtuu EPS:n korkeammasta diffuusiovastuskertoimesta. Lisäeristäminen heikentää katon kuivumiskapasiteettia tasosta 7,6 – 26,5 ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ a})$ ) arvoon 1 ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ a})$ ). Tämän vuoksi EPS-eristeen paksuudeksi suositellaan korkeintaan 150 millimetriä. Eristelaaduksi tulee valita materiaali, jolla on mahdollisimman pieni vesihöyrynvastus. Sekä rakennusaikaiseen kosteudenhallintaan että katemateriaalin kunnossapitoon joudutaan kiinnittämään erityistä huomiota, koska kosteuden poistuminen rakenteesta on hidasta. Rakenteen kuivumista voidaan tehostaa käyttämällä uritusta eristeen alapinnassa ja jättämällä eristelevyjen väleihin tuuletusrakoja, jolloin voidaan käyttää myös 200 mm paksuista EPS-eristettä. (Vahanen Oy 2012a.)

#### 4.4 Maanvastainen alapohja

Tässä työssä tarkasteltava alapohjarakenne on maanvastainen alapohja, jossa kantava rakenne on teräsbetonilaatta ja lämmöneriste on EPS. Rakenne on esitetty kuvassa 15. Kyseistä rakennetta käytetään laajasti kerrostalo- ja toimitilarakentamisessa. Pientaloissa maanvastaisen alapohjan vaihtoehto on ryömintätilainen alapohja.



Kuva 15. Alapohjan rakennetyyppi. (RT 83-11009 2010.)

Merkittävämmät maanvastaisia rakenteita kuormittavat kosteuslähteet ovat maaperän kosteus, sade- ja pintavedet, pohjavesi, betonin alkukosteus sekä sisäilman kosteus. Jos betonilaatta päällystetään tiiviillä muovimatolla, voi suhteellinen kosteus nousta päällysteen alapinnassa joissakin olosuhteissa kriittiselle tasolle. Rakenne tulee suunnitella sellaiseksi, ettei kriittinen kosteuspitoisuus ylitä ja että rakenteen kuivuminen on mahdollista kaikissa olosuhteissa (Leivo & Rantala 2002, s. 11). Korkea suhteellinen kosteus lattiapäällysteen alapinnassa voi vaurioittaa päällystemateriaalia ja liimaa. Vaurioituneista materiaaleista voi aiheutua sisäilmaan haitallisia päästöjä. Lähtökohtana alapohjarakenteen rakennusfysikaaliselle toimivuudelle on, ettei vesi pääse imeytymään maasta kapillaarisesti. (Vinha 2014, s. 151 – 157.)

Maan ominaisuudet ulkopuolisena rajapintana eroavat huomattavasti ulkoilman ominaisuuksista. Maapohjan lämpö- ja kosteusolosuhteet muuttuvat varaavan massan vuoksi hitaammin kuin ulkoilman sääolosuhteet. Lisäksi maalla on merkittävä eristävä vaikutus. Suuren rakennuksen keskialueilla rakennuksen alapuolinen maapohja lämpenee ensimmäisen vuoden kuluessa lähelle sisäilman lämpötilaa, ja olosuhteet voivat olla tämän jälkeen muuttumattomat vuodenaajoista riippumatta. Rakennuksen reuna-alueilla lämpötila on lähempänä ulkoilman lämpötilaa ja maa voi jäätää talvella. Maan lämpötila voi olla erityisen korkea, jos alapohjassa on lattialämmitys tai jos rakennuksen alla on lämpöputkia. (Vinha 2014, s. 151 – 157.)

Maassa oletetaan olevan aina niin paljon kosteutta, että huokosilma on kyllästystilassa, eli sen suhteellinen kosteus on 100 %. Vesihöyryn osapaine maassa on näin ollen sitä suurempi, mitä korkeampi maan lämpötila on. Rakenteen maanvastaisista pintaa kuormittaa ainakin ajoittain myös sadevedestä tai pohjavedestä peräisin oleva vapaa vesi. (Vinha 2014, s. 151 – 157.)

Rakennus ja sen ympäristö tulee suunnitella siten, että nestemäinen vesi ohjataan pois rakennuksen luota. Sadevedet johdetaan pois rakennuksen luolta maan kallistuksilla ja sadevesiviemäröinnillä. Rakennuksen alla ja sivuilla käytetään karkearakeista soraa, joka estää veden kapillaarisen siirtymisen maasta rakennukseen. Rakennuksen ympärille tehdään salaojat, jotka siirtävät vettä pois rakennuksen välittömästä läheisyydestä. Rakennuksen alla vettä läpäisemätön perusmaa kallistetaan kohti salaojia. Näillä toimenpiteillä pyritään tilanteeseen, jossa rakennuspohjan suhteellinen kosteus on 100 %, mutta vapaa vesi kuormittaa rakennetta vain ajoittain eikä vesi pääse siirtymään kapillaarisesti. (Vinha 2014, s. 15 – 157.)

Maanvastaisen alapohjan ilmatiiviys on erittäin tärkeää rakenteen toimivuuden kannalta. Painovoimainen ilmanvaihto ja koneellinen poistoilmanvaihto aiheuttavat alimpaan kerrokseen alipaineen, joka pyrkii ottamaan korvausilmaa vuotokohtien kautta maapohjasta. Koska maassa rakennuksen alla esiintyy aina mikrobikasvua ja lisäksi maasta haihtuu muita haitallisia aineita, kuten radonia, on sisäilman laadun kannalta tärkeää, ettei maapohjan ja sisäilman välillä ole ilmayhteyttä. (Pitkäranta 2016, s. 185; Vinha 2014, s. 151 – 157.)

Kosteuden siirtyminen maanvastaisessa alapohjassa vaihtelee sen mukaan, onko kyseessä uusi vai käyttötilassa oleva rakennus ja onko lattiapäällyste vesihöyryä läpäisevää vai tiivistä materiaalia. Eri tilanteita on havainnollistettu taulukossa 7. Koska kosteusvirran suunta muuttuu rakenteen elinkaaren aikana, rakenteeseen ei asenneta höyrynsulkua mihinkään kohtaan (Leivo & Rantala 2002).

Uudessa rakenteessa betoni sisältää runsaasti alkukosteutta. Alkukosteus poistuu sekä haihtumalla sisäilmaan että diffuusiolla maapohjaan. Kosteudensiirto diffuusiolla on sitä nopeampaa, mitä viileämpi maapohja on, sillä vesihöyryn osapaine maassa riippuu lämpötilasta. Paksu lämmöneriste vähentää kosteudensiirtoa alaspäin. Kosteuden haihtuminen sisäilmaan poistaa rakenteesta alkukosteutta, kunnes laatan päälle asennetaan tiivis päällyste. Tiivistä päällystemateriaalia käytettäessä on erittäin tärkeää antaa betonin kuivua riittävän pitkään ennen päällysteen asentamista. (Leivo & Rantala 2002.)

Diffuusiosta aiheutuvan kosteusvirran suunta muuttuu, kun maa rakennuksen alla lämpenee. Tilannetta on havainnollistettu kuvalla taulukossa 7. Lämpimässä maassa absoluuttinen kosteuspitoisuus on korkeampi kuin sisäilmassa. Ongelmaksi tilanne voi muodostua, jos lattiapäällysteen vesihöyrynvastus on suuri suhteessa alapuolisten rakennekerrosten vastukseen. Tällöin suhteellinen kosteus päällysteen alapinnassa voi nousta kriittiselle tasolle. Rakenne saadaan toimivaksi käyttämällä eristemateriaalia, jolla on riittävän korkea vesihöyrynvastus ja päällystemateriaalia, jolla on riittävän matala vesihöyrynvastus. (Vinha 2014, s. 151 – 157.)

Tiivis lattiapäällyste voi johtaa korkeaan suhteelliseen kosteuteen päällysteen alapinnassa, jos maa on erityisen lämmin. Esimerkiksi seuraavat tilanteet voivat aiheuttaa maan korkean lämpötilan:

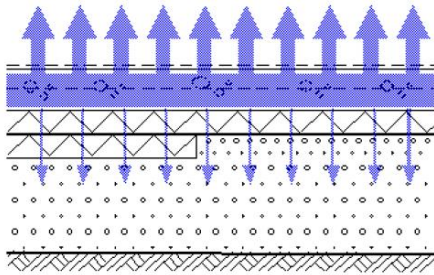
- Rakennuksen alla on lämpöputkia.
- Osissa alapohjaa, esimerkiksi kantavan seinälinjan alla lämmöneriste puuttuu.
- Lattialämmitys kytketään kesällä pois päältä, jolloin betonilaatta jäähtyy maata nopeammin.

Lisäksi vesihöyryä läpäisevä päällyste on turvallisempi vikatilanteessa, jossa rakenteeseen pääsee vettä esimerkiksi vuodon seurauksena. (Vinha 2014, s. 151 – 157.)



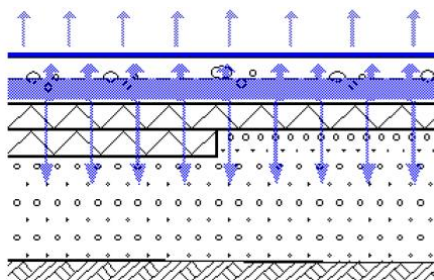
Taulukko 7. Kosteuden siirtyminen maanvastaisessa alapohjassa. (Leivo & Rantala 2002; Vinha 2014, s. 154 – 156.)

Uusi rakennus, ennen pinnoittamista tai kun lattiapäällyste läpäisee vesihöyryä



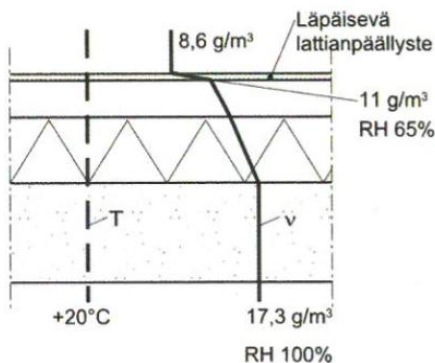
- Maapohja rakennuksen alla on viileämpi kuin sisäilma.
- Rakennuskosteus poistuu haihtumalla sisäilmaan ja diffuusiolla maahan.

Uusi rakennus, tiivis lattiapäällyste



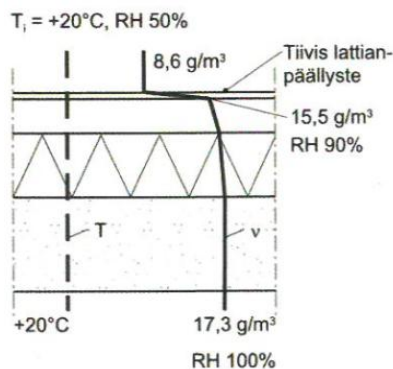
- Rakennuskosteuden kuivuminen ylöspäin vähenee tai loppuu.
- Päällysteen saa asentaa vasta, kun rakennuskosteus on pääosin kuivunut.
- Paksu lämmöneriste hidastaa rakennuskosteuden poistumista.

Käyttöolosuhteet rakennuksen keskiosassa, vesihöyryä läpäisevä lattiapäällyste



- Maapohjan lämpötila on niin korkea, että maapohjan vesihöyryn osapaine on suurempi kuin sisäilman vesihöyryn osapaine. Diffuusion suunta on alhaalta ylöspäin.

Käyttöolosuhteet rakennuksen keskiosassa, tiivis lattiapäällyste



- Diffuusion suunta on alhaalta ylöspäin.
- Suhteellinen kosteus päällysteen alapinnassa voi nousta haitalliselle tasolle, jos maa on erityisen lämmin.
- Vikatilanteissa rakenteen kuivuminen on hidasta.

Kosteusteknisen toimivuuden kannalta alapohjan lämmöneristeen paksuuden kasvattamisella on positiivinen vaikutus. Mitä paksumpi eriste on, sitä vähemmän kosteutta siirtyy diffuusiolla maasta ylöspäin ja sitä matalammaksi jää eristeen alapinnan suhteellinen kosteus. Lämmöneriste tulee aina sijoittaa betonilaatan alle ja sitä tulee käyttää kauttaaltaan koko rakennuksen alla, myös keskialueella ja kantavien seinien alla. Kosteustekniikan kannalta materiaali, jonka vesihöyrynvastus on suuri, on edullisempi. (Leivo & Rantala 2002.)

Viimeaikaisista matalaenergiarakentamiseen liittyvistä tutkimuksista TTY:n (Vinha et al. 2008, s. 34 – 44) ja VTT:n (2008, s. 21) tutkimukset sekä Rakenteellinen energiatehokkuus -Opas (Lylykangas et al. 2016, s. 212) vahvistavat maanvastaisen alapohjan lämmöneristeen lisäämisen olevan kosteusteknisesti turvallista. Toisaalta jo nykyinen eristepaksuus on kosteustekniikan kannalta riittävä (Vinha et al. 2008, s. 34 – 44).

TTY:n raportissa painotetaan, että lämmöneristeen lisääminen ei juurikaan säästä lämmitys-energiaa, koska maan eristävä vaikutus on niin merkittävä. Maan lämpötilan rakennuksen keskiosissa on kylmimmillään 16 °C, joten lämpövuoto alapohjan läpi on joka tapauksessa pieni. Lisäksi paksun eristeen käyttö voi aiheuttaa alapohjassa ongelmia eristeen joustamisesta seuraavien muodonmuutosten vuoksi. (Vinha et al. 2008, s. 34 – 44.) Alapohjan matala U-arvo myös viilentää perustuksia ja lisää routasuojauksen tarvetta (Vinha et al. 2008, s. 78 – 79).



## 5 Laskentamallit

### 5.1 Malleille yhteisiä määrittelyjä

#### 5.1.1 Ulko- ja sisäilman olosuhteet

Ulkoilman olosuhteina käytettiin Vantaa 2030 rakennusfysiikan testivuoden säädataa, joka on ladattavissa Ilmatieteen laitoksen internetsivulta (Ilmatieteen laitos 2013). Säädata sisältää tunneittain muuttuvat arvot ulkoilman lämpötilalle, suhteelliselle kosteudelle, sateelle, tuulen nopeudelle ja suunnalle sekä auringon säteilylle. Rakennusfysiikan testivuodet on valittu siten, että vähintään 90 % vuosista on rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta edullisempia kuin valittu testivuosi. Vuoden 2030 säädata on tuotettu muokkaamalla nykyilmaston olosuhteita ennustettu ilmastonmuutos huomioiden. (Vinha 2013, s. 70 – 73.)

Sisäilman lämpötilaksi asetettiin vakioarvo 21 °C. Sisäilman suhteellinen kosteus riippuu ulkoilman suhteellisesta kosteudesta ja sisäilman kosteuslisästä. Sisäilman suhteellisen kosteuden lasku on esitetty liitteessä 2.

#### 5.1.2 Materiaaliominaisuudet

Lämmön- ja kosteudensiirron yhtälöiden ratkaisemiseksi tarvittavat materiaaliominaisuudet ovat tiheys, lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti, hygroskooppinen tasapainokosteus, diffuusiovastuskerroin ja kapillaarinen kosteudenjohtavuus. Hygroskooppinen tasapainokosteus riippuu suhteellisesta kosteudesta ja lämmönjohtavuus ja kapillaarinen kosteudenjohtavuus riippuvat kosteuspitoisuudesta.

Höyryn ja nestemäisen veden siirtymistä käsitellään kosteudensiirron osittais-differentiaaliyhtälössä käyttämällä kuivan materiaalin diffuusiovastuskerrointa ja kasvattamalla kosteudenjohtavuuden arvoa kapillaarisella alueella (Vinha 2014, s. 395). Materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden (kaava(22)) laskemista yksinkertaistettiin työssä käyttämällä ilman vesihöyrynläpäisevyyden laskennassa (kaava (23)) vakiolämpötilaa 10 °C, jolloin ilman vesihöyrynläpäisevyys on  $1,9 \cdot 10^{-10} \text{ kg/(m s Pa)}$ .

Materiaaliominaisuudet työhön saatiin soveltuvien osin WUFI®-ohjelman materiaalitietokannasta, Fraunhofer Institut für Bauphysik -katalogista. Tietokannasta puuttuvien materiaalien ominaisuudet saatiin Applied Building Physics -oppikirjasta (Hens 2016). Kevytsoran tapauksessa hyödynnettiin myös valmistajan antamia tietoja (Weber 2016). Ilmaa mallinnettiin COMSOL Multiphysics -ohjelman materiaalikirjaston materiaalilla Air. Materiaaliominaisuudet on esitelty kokonaisuudessaan liitteessä 1. Liitteestä löytyvät materiaalien vakioarvoiset ominaisuudet, tasapainokosteuskäyrät ja lämmönjohtavuuden ja kosteudenjohtavuuden interpolaatiofunktiot sekä ilman ominaisuuksien lämpötilariippuvuuden kaavat.

#### 5.1.3 Laskentaohjelmat ja laskennan asetukset

Laskentaan käytettiin COMSOL Multiphysics -ohjelman versiota 5.3. Ohjelmasta käytettiin lämmönsiirtomoduulia (Heat Transfer Module) ja siihen sisäänrakennettuja fysiikkamoduuleja Heat Transfer in Building Materials ja Moisture Transfer in Building Materials sekä nämä yhdistävää multifysiikkamoduulia Heat and Moisture. COMSOL Multiphysics -ohjelman rinnalla käytettiin WUFI® 2D -ohjelmaa betonisandwich-ulkoseinän tapauksessa.

Lämmön- ja kosteudensiirron osittaisdifferentiaaliyhtälöt ratkaistiin eriytettyllä ratkaisijalla (engl. segregated solver). Kyseinen ratkaisija ratkaisee muuttujia lämpötila ja suhteellinen kosteus vuorotellen iteroiden, kunnes molemmat muuttujat toteuttavat osittaisdifferentiaaliyhtälöt sallitun toleranssin rajoissa. Toleranssina käytettiin arvoa 0,001.

Työssä tarkasteltiin rakenteiden lämpötilaa ja suhteellista kosteutta viiden vuoden aikana. Aika-askeleen pituus oli yksi tunti. Olosuhteina käytettiin viittä peräkkäistä rakennusfysiikan testivuotta, jolloin tarkastelu on varmalla puolella. Tarkastelujakson pituus johtuu rakennusmateriaalien alkukosteuden kuivumisen hitaudesta. Viiden vuoden tarkastelujaksoa käytettäessä voidaan useimpien rakenteiden tapauksessa sanoa rakenteen saavuttaneen käyttöolosuhteita vastaavan suhteellisen kosteuden. Kevytsorakaton laskentamalleissa katsottiin kolmen vuoden laskenta-ajan olevan riittävä, koska alkukosteus poistui rakenteista pääosin jo ensimmäisen vuoden aikana.

## **5.2 Betonisandwich-ulkoseinä**

### **5.2.1 Mallinnettavien ilmiöiden ja tilaulottuvuuden valinta**

Betonisandwich-ulkoseinän kosteusteknisessä toiminnassa on merkittävässä roolissa tuuletusurissa tapahtuva ilmavirtaus. Työn tavoitteiden mukaisesti tuulettusta haluttiin mallintaa mahdollisimman tarkasti kolmiulotteista geometriaa hyödyntäen. Kolmiulotteinen tarkastelu tuo esille tuuletusilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutoksen sen virratessa tuuletusurassa. Lisäksi kolmiulotteisen tarkastelun katsottiin yleisesti tuovan alalle uutta tietoa ja kokemuksia sen soveltuvuudesta ja käytettävyydestä rakennusfysiikkaan tarkasteluihin. Kolmiulotteisen laskentamallin ratkaisemiseen käytettiin COMSOL Multiphysics -ohjelmaa.

Kolmiulotteisen laskennan rinnalla sama rakenne ratkaistiin myös kaksiulotteisena laskentana WUFI® 2D -ohjelmalla. Kaksiulotteisen laskennan etuna oli merkittävästi lyhyempi laskenta-aika, minkä ansiosta malli voitiin ratkaista viiden vuoden laskenta-ajalle.

Betonisandwich-ulkoseinän mallissa viistosade sisällytettiin malliin ASHRAE-standardin mukaisesti (liite 3). Auringon säteilyä ei sisällytetty malliin. Pystysuoralle pinnalle osuvaa auringonsäteilyä on vaikea arvioida laskennallisesti, sillä muut rakennukset ja puut voivat aiheuttaa pinnalle varjoja. Auringon säteilyllä on rakennetta kuivattava eli kosteusteknisen toiminnan kannalta edullinen vaikutus, joten sen pois jättäminen on varmalla puolella.

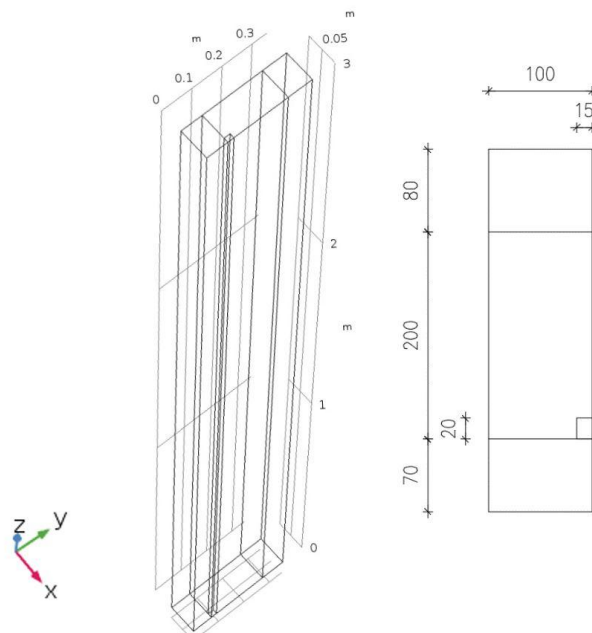
Kaksi- ja kolmiulotteisen ajasta riippuvan laskennan lisäksi betonisandwich-ulkoseinän tapauksessa perehdyttiin kysymykseen, miten eristepaksuus vaikuttaa rakenteen kuivumiskapasiteettiin. Kysymystä tarkasteltiin yksinkertaistetun käsinlaskentaesimerkin avulla kahdelle eri ulkoilman lämpötilalle. Laskuesimerkki on esitelty liitteessä 6 ja tuloksia on käsitelty luvussa 6.1.

### **5.2.2 Geometria**

Mallinnettavat materiaalikerrokset olivat betoniulkokuori, mineraalivilla ja betonisisäkuori (kuva 16). Lisäksi mallinnettiin mineraalivillassa oleva tuuletusura. Valitussa geometriassa tuuletusuran koko oli 30 mm x 20 mm ja se rajoittui betoniulkokuoreen. Tuuletusurien

keskeltä keskelle -mitta oli 200 mm. Elementin korkeus ja siten tuuletusuran tulo- ja poistaukkujen etäisyys oli 3 m. Valittu geometria edustaa kosteusteknisen toiminnan kannalta mahdollisimman epäedullista tilannetta, jossa tuuletusuran poikkipinta-ala on pieni, urien etäisyys on melko pitkä, tuuletuspituus on pitkä ja ura sijaitsee ulkokuorta vasten.

Mallin laskennassa hyödynnettiin symmetriareunaehtoa molemmilla reunoilla leveys-suunnassa eli x-akselin suunnassa (kuva 16). Geometristen parametrien arvot on esitelty kohdassa 5.2.6 taulukossa 8.



Kuva 16. Betonisandwich-ulkoseinän geometrian mallintaminen COMSOL Multiphysics -ohjelmassa (vasemmalla) ja WUFI® 2D -ohjelmassa (oikealla).

### 5.2.3 Ilmavirtauksen mallintaminen

#### COMSOL Multiphysics

Ilman virtaus tuuletusurassa on seurausta savupiippuvaikutuksesta ja tuulen aiheuttamista paine-eroista. Ilmavirtausta mallinnettiin COMSOL Multiphysics -ohjelman fysiikkamoduulilla Laminar Flow ja siihen yhdistetyllä multifysiikkamoduulilla Nonisothermal Flow. Virtaus on mallissa laminaarista ja kokoonpuristumatonta. Ilman virtaus laskettiin ajasta riippumattomana laskentana siten että ilman lämpötila oli 7,6 °C, joka vastaa Vantaa 2030 rakennusfysiikan testivuoden ulkoilman keskilämpötilaa.

Tuuletusurassa virtaavan ilman nopeutta ei tutkittu tämän työn puitteissa, vaan nopeuden suuruusluokkaa arvioitiin Salonvaaran ja Niemisen (2003) tutkimuksen avulla. Tutkimuksessa saadut virtausnopeudet ovat luokkaa 0,060 – 0,1 m/s. Tässä työssä käytettiin arvoa 0,1 m/s. Virtauksen reunaehtona pystyseinämillä käytettiin liukumattomuusehtoa. Seinämällä, joka on tuuletusuran puolivälissä, eli jonka x-koordinaatin arvo on 0,1 m (kuva 16) käytettiin symmetriareunaehtoa. Reunaehtona tuloaukossa oli virtausnopeus 0,1 m/s. Poistaukossa reunaehtona oli paine 0 Pa. Ilman oletettiin virtaavan savupiippuvaikutuksen vuoksi alhaalta ylös.

## WUFI® 2D

WUFI® 2D -ohjelmassa laskentamalli ei sisällä ilmavirtausta, vaan ohjelma käsittelee tuuletusilmaa lähde-terminä (Air Source). Ilmanvaihtuvuus tuuletusurassa on 120 1/h (kaava (44)).

$$\dots = \frac{Q}{V} = \frac{u \cdot A}{H_L \cdot A} = \frac{u}{H_L} = \frac{0,1 \text{ m/s}}{3 \text{ m}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 120 \text{ 1/h} \quad (44)$$

missä

- $ACH$  on ilmanvaihtuvuus [1/h]
- $Q$  on tilavuusvirta [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $V$  on tilavuus [ $\text{m}^3$ ]
- $u$  on ilman virtausnopeus [ $\text{m/s}$ ]
- $A$  on poikkipinta-ala [ $\text{m}^2$ ]
- $H_L$  on korkeus [m]

## 5.2.4 Lämmön- ja kosteudensiirron mallintaminen

### COMSOL Multiphysics

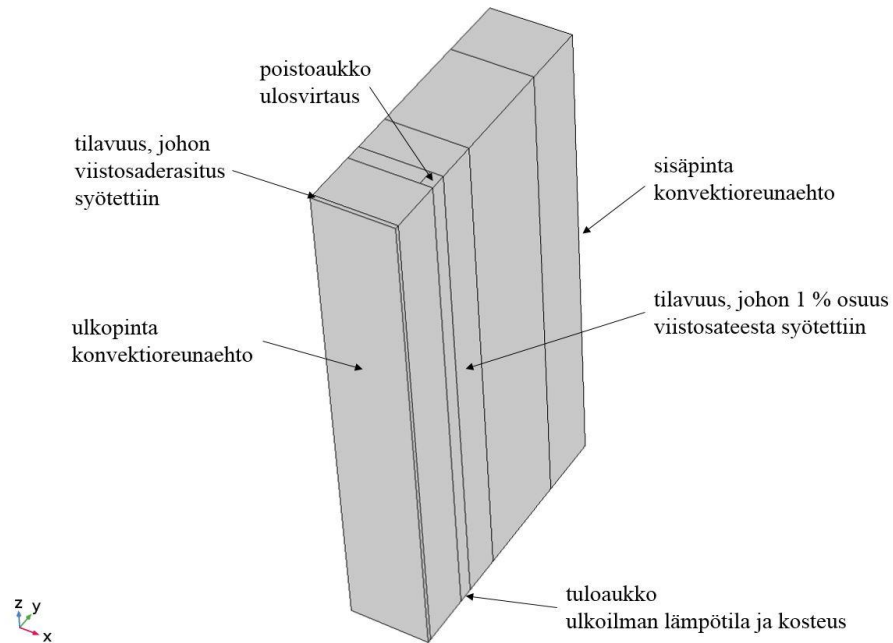
Lämmön- ja kosteudensiirron laskentaan käytettiin luvussa 3.4 esiteltyjä osittais-differentiaaliyhtälöitä (kaavat (33) ja (35)) ja niiden reunaehtoja. Laskentaan käytettiin COMSOL Multiphysics -ohjelman fysiikkamoduuleita Heat Transfer in Building Materials ja Moisture Transport in Building Materials sekä nämä yhdistävää multifysiikkamoduulia Heat and Moisture. Moduuleissa huokoisia materiaaleja eli betonia ja mineraalivillaa mallinnettiin toiminnolla Building Material ja ilmaa toiminnolla Moist Air.

Käytetyt reunaehdot olivat:

- konvektioreunaehto sisäilmaan rajoittuvalla pinnalla
- konvektioreunaehto ulkoilmaan rajoittuvalla pinnalla
- ulkoilman lämpötila ja kosteus tuloaukossa
- ulosvirtaus poistoaukossa
- symmetriaehto tasoissa  $x = 0 \text{ m}$  ja  $x = 0,1 \text{ m}$
- adiabaattinen ja vesitiivis pinta kaikilla muilla pinnoilla, joita ovat ala- ja yläpuoli lukuun ottamatta tuuletusuran tulo- ja poistoaukkoja.

Käytettyjä reunaehtoja on havainnollistettu kuvassa 17. Lämmön- ja kosteudensiirtoon liittyvien parametrien arvot on esitetty kohdassa 5.2.6 taulukossa 8. Kyseisestä taulukosta löytyvät myös materiaalien lämpötilat ja suhteelliset kosteudet alkutilanteessa.

Kosteudensiirron osittaisdifferentiaaliyhtälöä muokattiin betonisandwich-ulkoseinän tapauksessa lisäämällä viistosade yhtälöön lähde-terminä. Viistosadekuormitus määritettiin ASHRAE-standardin mukaisesti (ASHRAE 2009, s. 6 – 7). Viistosadekuormituksen määrän laskeminen ja lisääminen reunaehdoksi ja lähde-terminä on selostettu liitteessä 3.



Kuva 17. Betonisandwich-ulkoseinän kolmiulotteisessa laskentamallissa käytetyt reunaehdot. Pinnoilla, joille ei anneta kuvassa reunaehtoa, käytettiin adiabaattista ja vesitiivistä pintaa. Kappaleen korkeutta on pienennetty visuaalisista syistä.

## WUFI® 2D

Kaksiulotteinen laskentamalli eroaa kolmiulotteisesta laskentamallista tuuletusuran mallintamisen osalta. WUFI® 2D -ohjelmassa tuuletusta voidaan mallintaa lisäämällä lähde-termi ”AirExchange Source”. Laskentatapa poikkeaa näin ollen kaavojen (36) ja (37) mukaisesta laskentatavasta. Lähde-termi sisältää ilmanvaihdon vaikutuksen lämmön- ja kosteudensiirtoon kaavojen (45) ja (46) mukaisesti (Karagiozis & Künzelt 2009). Kaavan (44) mukaisesti ilmanvaihtuvuudeksi määriteltiin 120 1/h. Kaksiulotteinen laskentamalli vastaa seinän yläpään pintaa.

$$S_h = \frac{ACH}{3600 \text{ s/h}} \cdot \rho_a \cdot (H_{out} - H_{ura}) \quad (45)$$

$$S_w = \frac{ACH}{3600 \text{ s/h}} \cdot (x_{out} - x_{ura}) \quad (46)$$

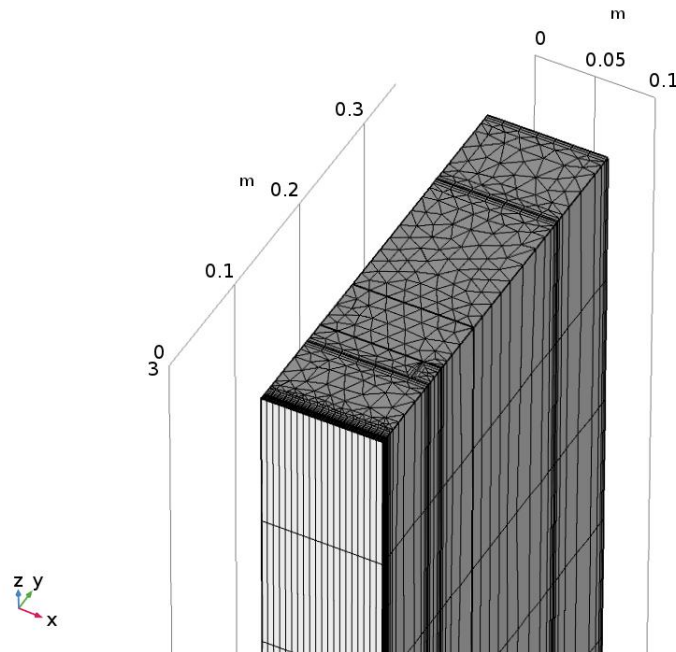
missä

- $S_h$  on lämmönlähde [ $\text{W/m}^3$ ]
- $ACH$  on ilmanvaihtuvuus [1/h]
- $\rho_a$  on ilman tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $H_{out}$  on ulkoilman entalpia [ $\text{J/kg}$ ]
- $H_{ura}$  on ilman entalpia tuuletusuran poistoaukossa [ $\text{J/kg}$ ]
- $S_w$  on kosteuslähde [ $\text{kg}/(\text{m}^3 \text{ s})$ ]
- $x_{out}$  on ulkoilman kosteuspitoisuus [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $x_{ura}$  on ilman kosteuspitoisuus tuuletusuran poistoaukossa [ $\text{kg/m}^3$ ]

## 5.2.5 Verkotus

### COMSOL Multiphysics

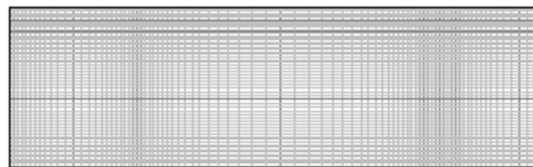
Laskentaverkkona käytettiin niin sanottua pyyhkäistyä verkkoa (Swept), jossa tilaelementit ovat muodoltaan kolmiopohjaisia lieriöitä (kuva 18). Tilaelementtien koko vaihtelee siten että suurimpia tilaelementtejä käytettiin materiaalikerrosten keskiosissa ja pienimpiä lähellä ulkoreunaa, rajakerroksissa ja tuuletusurassa.



Kuva 18. Betonisandwich-ulkoseinän kolmiulotteisessa laskentamallissa käytetty laskentaverkko.

### WUFI® 2D

Kaksiulotteisessa laskentamallissa käytettiin suorakaiteen muotoisia laskentaelementtejä (kuva 19). Elementtiverkko on hieman tiheämpi lähellä rajapintoja. Kaksiulotteisessa laskentamallissa verkko oli mahdollista luoda hyvin tiheäksi ilman että se aiheutti laskenta-aikaan liittyviä ongelmia.



Kuva 19. Betonisandwich-ulkoseinän kaksiulotteisessa laskentamallissa käytetty laskentaverkko.

## 5.2.6 Parametrien arvot

*Taulukko 8. Betonisandwich-ulkoseinän laskennassa käytettyjen parametrien arvot.*

sisäkuoren paksuus	80 mm
mineraalivillan paksuus	200 mm
ulkokuoren paksuus	70 mm
tuuletusurien etäisyys	200 mm
seinäelementin korkeus eli tuuletusaukkojen etäisyys	3 m
tuuletusuran leveys	30 mm
tuuletusuran syvyys	20 mm
ilman nopeus tuloaukon kohdalla (3D-laskennassa)	0,1 m/s
ilman lämpötila virtauslaskennassa (3D-laskennassa)	7,6 °C
ilmanvaihtuvuus tuuletusurassa (2D-laskennassa)	120 1/h
sisäpuolinen konvektiokerroin	13 W/(m <sup>2</sup> K)
ulkopuolinen konvektiokerroin	25 W/(m <sup>2</sup> K)
ulkokuoren ja tuuletusilman alkulämpötila	ulkoilman lämpötila
sisäkuoren ja mineraalivillan alkulämpötila	21 °C
betonin suhteellinen kosteus alkutilanteessa	90 %
mineraalivillan suhteellinen kosteus alkutilanteessa	80 %
tuuletusilman suhteellinen kosteus alkutilanteessa	99 % <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ulkoilman suhteellinen kosteus 1.1. klo 00.

## 5.3 Kevytsorakatto

### 5.3.1 Mallinnettavien ilmiöiden ja tilaulottuvuuden valinta

Kevytsorakaton erityispiirre on tuuletusilmavirtaus, joka tapahtuu koko kevytsorakerroksen paksuudella kevytsorarakeiden välisessä huokostilassa. COMSOL Multiphysics -ohjelmassa Heat and Moisture -toiminnolla toisiinsa kytkettyjä lämmön- ja kosteudensiirtoa voidaan mallintaa kahdessa erilaisessa väliaineessa: huokoisessa aineessa (Building Material) tai ilmassa (Moist Air). Näistä ensimmäinen sisältää oletuksen, ettei materiaalin sisällä tapahdu konvektiivista lämmön- tai kosteudensiirtoa. Jälkimmäinen puolestaan ei mahdollista kiinteän väliaineen sisällyttämistä laskenta-alueeseen. Kevytsorassa tapahtuvaa lämmön- ja kosteudensiirtoa ei näin ollen sellaisenaan voida mallintaa COMSOL Multiphysics -ohjelman version 5.3 Heat and Moisture -multifysiikkamoduulilla.

Kevytsoran kaltaisessa rakeisessa aineessa tapahtuvaa ilmavirtausta voidaan tutkia Darcyn lain avulla. COMSOL Multiphysics -ohjelma fysiikkamoduulit Darcy's law ja Heat Transfer in Porous Media soveltuvat rakeisessa aineessa tapahtuvan virtauksen ja lämmönsiirron tarkasteluun. Ongelmaksi muodostui kuitenkin kosteudensiirron yhdistäminen kyseisiin moduuleihin, sillä valmista multifysiikkakytkentää ei ole saatavilla.

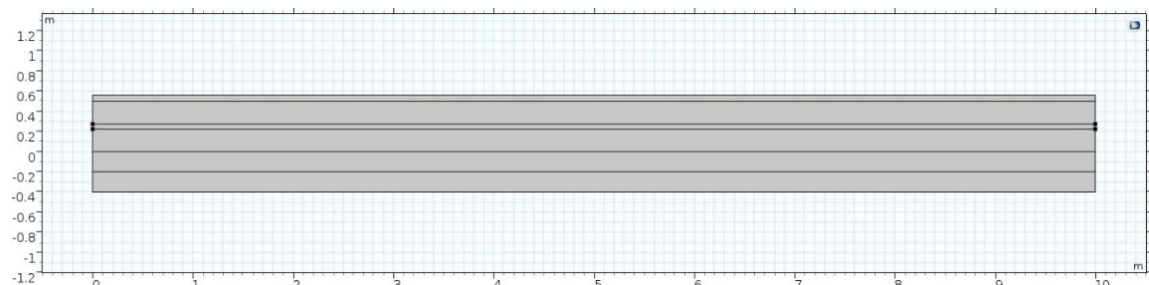
Tästä johtuen kevytsorakatto mallinnettiin jakamalla kevytsora-ainekerros huokoiseen aineeseen (Building Material) ja tuuletusilmaan (Moist Air). Ensimmäisessä vaiheessa ilmavirtausta tutkittiin Darcy's law -fysiikkamoduulilla (liite 5), minkä jälkeen saatuja lähtötietoja hyödynnettiin varsinaisen laskentamallin luomisessa. Rakennetyypiä tarkasteltiin kaksiulotteisesti. Malliin voitiin näin ollen sisällyttää vaakasuuntainen tuuletus räystäältä räystäälle ja pystysuuntainen lämmön- ja kosteudensiirto.

Kevytsorakaton malliin sisällytettiin auringon säteily (liite 4), jolla on rakennetta lämmittävä ja kuivattava vaikutus. Katon oletettiin olevan altis auringon säteilylle ilman varjostavia elementtejä. Sen sijaan saderasitusta ei sisällytetty malliin, koska katon toiminnan edellytyksenä on tiivis bitumikermi rakenteen uloimpana materiaalikerroksena.

### 5.3.2 Geometria

Kevytsorakaton rakennetyypit on esitelty tämän työn luvussa 4.3. Työssä tarkasteltavat rakennetyypit ovat pelkällä kevytsoralla eristetty katto sekä kevytsora-mineraalivilla- ja kevytsora-EPS-yhdistelmillä eristetyt katot. Eristemateriaalien lisäksi laskentamallin geometriassa on mukana kantava betonilaatta ja bitumikermikatteen alustana toimiva betoninen katelaatta (kuva 20).

Rakennetyypissä on edellä mainittujen materiaalien lisäksi kaksi bitumikerrosta, toinen uloimpana kerroksena ja toinen kantavan laatan päällä höyrynsulkuna. Bitumikermi mallintaminen geometrian ja materiaaliominaisuuksien avulla aiheutti malliin erittäin ohuita materiaalikerroksia, jotka pidensivät laskenta-aikaa merkittävästi. Tästä syystä uloimpana kerroksena oleva bitumikermi sisällytettiin ulkopuoliseen kosteudensiirron reunaehtoon ja höyrynsulkua mallinnettiin Thin Moisture Barrier -toiminnolla.



Kuva 20. Mineraalivilla ja EPS:llä lisäeristettyjen kevytsorakattojen geometrian mallintaminen COMSOL Multiphysics -ohjelmassa.

Taulukko 9. Kevytsorakaton laskennassa käytetyt vaihtoehtoiset geometriat.

tapaus	eristemateriaali(t)	virtausnopeus tuloaukossa
Kevytsorakatto ilman lisäeristettä	kevytsora 1000 mm	0,0296 m/s
Mineraalivillalla lisäeristetty kevytsorakatto	kevytsora 500 mm mineraalivilla 200 mm	0,0167 m/s
EPS:llä lisäeristetty kevytsora-katto	kevytsora 500 mm EPS 200 mm	0,0167 m/s

Laskentamallissa ilmavirtausta mallinnettiin lisäämällä kevytsorakerroksen puoliväliin 50 mm korkea tuuletusväli. Virtauksen suunta on vasemmalta oikealle. Malli ratkaistiin



kolmella eri materiaaliyhdistelmällä (taulukko 9). Tuuletuspituudelle käytettiin arvoa 10 m. Geometriaan liittyvien parametrien arvot on annettu kohdassa 5.3.6 taulukossa 10.

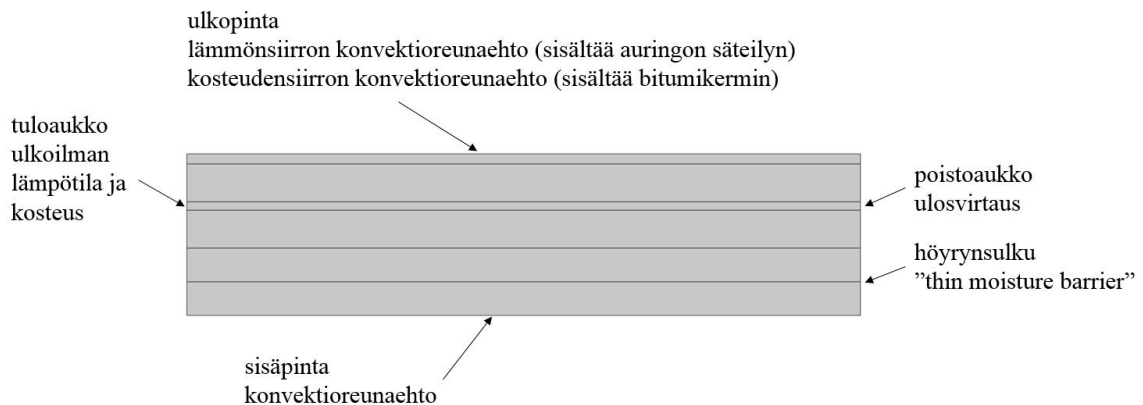
### 5.3.3 Ilmavirtauksen mallintaminen

Kevytsorakerroksessa tapahtuvan ilmavirtauksen tilavuusvirran laskenta on esitelty liitteessä 5. Laskelman tuloksena saatiin tilavuusvirta sekä virtausnopeus mallissa käytetyssä 50 mm paksussa tuuletusvälissä. Virtausnopeuden arvo ratkaistiin kevytsorakerroksen kahdelle eri paksuudelle. Virtausnopeus tuuletusvälissä sai arvoja väliltä 0,0167 – 0,0296 m/s (taulukko 9).

Ilmavirtaa mallinnettiin COMSOL Multiphysics -ohjelmassa fysiikkamoduulilla Laminar Flow. Virtaus oletettiin mallissa laminaariseksi ja kokoonpuristumattomaksi. Reunaehto seinämällä oli liukumattomuusehto. Tuloaukon kohdalla vaakasuuntaiseksi virtausnopeudeksi annettiin liitteen 5 mukaiset nopeudet, esimerkiksi kevytsorakerroksen paksuudella 500 mm ja tuuletuspituuden arvolla 10 m nopeus 0,0167 m/s. Poistoaukon reunaehto oli paine 0 Pa. Virtauskenttä ratkaistiin ajasta riippumattomana laskentana, minkä jälkeen sitä käytettiin lähtötietona lämmön- ja kosteudensiirron laskennassa.

### 5.3.4 Lämmön- ja kosteudensiirron mallintaminen

Lämmön- ja kosteudensiirtoa mallinnettiin COMSOL Multiphysics -ohjelman fysiikkamoduuleilla Heat Transfer in Building Materials ja Moisture Transport in Building Materials. Moduuleissa käytetyt osittaisdifferentiaaliyhtälöt (kaavat (33) ja (35)) on esitelty luvussa 3.4. Tuuletusvälissä olevaa ilma mallinnettiin toiminnolla Moist Air ja kaikkia muita ainekerroksia toiminnolla Building Material.



Kuva 21. Kevytsorakaton laskentamallissa käytetyt reunaehdot. Kappaleen leveyttä on pienennetty visuaalisista syistä.

Laskennassa käytettiin seuraavia reunaehtoja (kuva 21):

- sisäilmaan rajoittuvalla pinnalla konvektioreunaehto
- lämmönsiirron reunaehto ulkoilmaan rajoittuvalla pinnalla konvektioreunaehto, johon sisällytettiin auringon säteily liitteen 4 mukaisesti
- kosteudensiirron reunaehto ulkoilmaan rajoittuvalla pinnalla konvektioreunaehto, jossa kosteudensiirron konvektiokerrointa muokattiin kaavojen (47), (48) ja (49) mukaisesti. Muokattu kosteudensiirron konvektiokerroin sisältää sekä pintavastuksen että bitumikermiä diffuusiiovastuksen osuudet.
- tuloaukossa ulkoilman olosuhteet

- poistoaukossa ulosvirtaus
- muilla pystysuorilla pinnoilla kuin tulo- ja poistoaukossa adiabaattinen ja vesitiivis pinta
- höyrinsulun mallintaminen Thin Moisture Barrier -toiminnolla, jossa höyrinsulun diffuusiiovastus lasketaan sen diffuusiiovastuskertoimen ja paksuuden avulla kaavan (49) mukaisesti.

$$\beta = \left( \frac{1}{\beta_s} + \frac{1}{\beta_{bitumi}} \right)^{-1} \quad (47)$$

$$\beta_s = 7,7 \cdot 10^{-9} \cdot h_{ce} \quad (48)$$

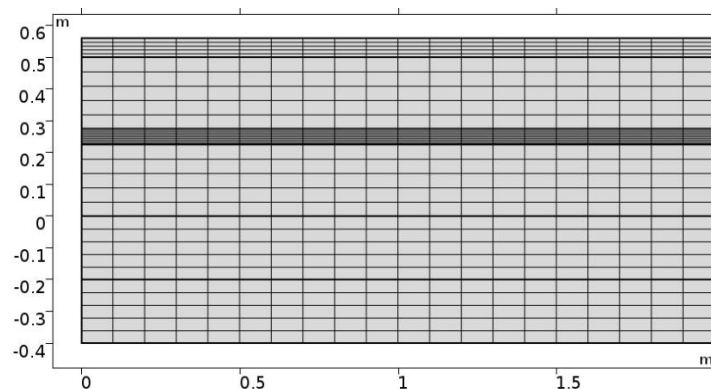
$$\beta_{bitumi} = \frac{\delta \cdot p_{sat}}{\mu \cdot t_{bitumi}} \quad (49)$$

missä  $\beta$  on diffuusiokerroin [s/m]  
 $\beta_s$  on pinnan diffuusiokerroin [s/m]  
 $\beta_{bitumi}$  on bitumikermin osuutta kuvaava diffuusiokerroin [s/m]  
 $h_{ce}$  on ulkopinnan konvektiokerroin [W/(m<sup>2</sup> K)]  
 $\delta$  on ilman vesihöyrynläpäisevyys [kg/(m s Pa)]  
 $p_{v,\bar{A}\bar{A}\bar{A}}$  on vesihöyryyn kyllästyspaine [Pa]  
 $\mu$  on bitumin diffuusiiovastuskerroin [-]  
 $t_{bitumi}$  on bitumikerroksen paksuus [m]

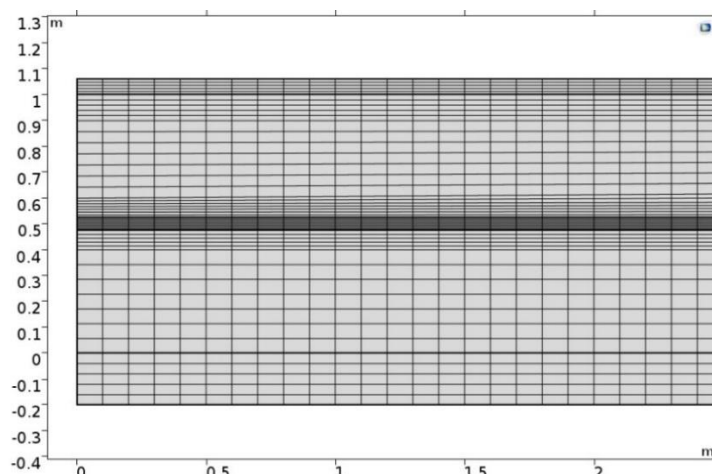
(Hens 2012, s. 204 – 206; COMSOL Multiphysics Heat Transfer Module User's Guide, s. 523 – 524.) Reunaehtoihin liittyvien parametrien arvot on annettu kohdassa 5.3.6 taulukossa 10.

### 5.3.5 Verkotus

Laskentaverkkona käytettiin suorakaiteen muotoisista laskentaelementeistä koostuvaa verkkoa. Elementtien leveys oli 100 mm. Jokainen materiaalikerros jaettiin pystysuunnassa viideksi elementiksi ja tuuletusväli jaettiin pystysuunnassa kymmeneksi elementiksi (kuva 22). Pelkällä kevytsoralla eristetyn kevytsorakaton mallissa tuuletusvälin ja katelaatan ympärille lisättiin ohuempia elementtejä kuvan 23 mukaisesti.



Kuva 22. Mineraalivillalla ja EPS:llä lisäeristettyjen kevytsorakattojen laskentamalleissa käytetty laskentaverkko.



Kuva 23. Pelkällä kevytsoralla eristetyin kevytsorakaton laskentamallissa käytetty laskentaverkko.

### 5.3.6 Parametrien arvot

Taulukko 10. Kevytsorakaton laskennassa käytettyjen parametrien arvot.

selite	arvo	lähdeviite
bitumikermien paksuus	8,8 mm	Nordic Waterproofing Oy 2017 <sup>1)</sup>
katelaatan paksuus	60 mm	
kevytsorakerroksen paksuus	500 mm/1000 mm	
mineraalivillan tai EPS:n paksuus	200 mm	
betonilaatan paksuus	200 mm	
tuuletuspituus	10 m	
tuuletusvälin paksuus	50 mm	
virtausnopeus tuloaukon kohdalla	liite 5	
sisäpuolinen konvektiokerroin	10 W/(m <sup>2</sup> K)	RakMK C4 2003, s. 13
ulkopuolinen konvektiokerroin	25 W/(m <sup>2</sup> K)	RakMK C4 2003, s. 13
bitumin diffuusiovastuskerroin	50 000	Hens 2016, s. 307
bitumin absorptiokerroin	0,93	Vinha 2014, s. 453
ilman vesihöyrynläpäisevyys	$1,9 \cdot 10^{-10}$ kg/(m s Pa)	Künzel 1995, s. 15

1) Kaksinkertainen bitumikermi,  $t_{bitumi} = 2 \cdot 4,4 \text{ mm} = 8,8 \text{ mm}$

## 5.4 Maanvastainen alapohja

### 5.4.1 Mallinnettavien ilmiöiden ja tilaulottuvuuden valinta

Maanvastaisen alapohjan kosteusteknistä toimintaa on käsitelty tämän työn luvussa 4.4. Lämpötila- ja kosteusolosuhteet riippuvat oleellisesti seuraavasta neljästä tekijästä:

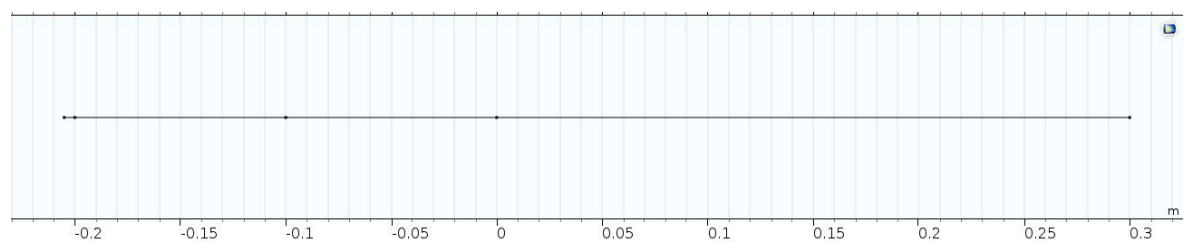
- rakenteen tarkastelu uutena betonin ollessa kostea tai käyttötilassa, jolloin betoni on kuivunut kosteuspitoisuuteen 85 %
- lattiapäällystemateriaalin diffuusiovastuskerroin
- lämmöneristeen paksuus
- tarkasteltavan kohdan sijainti rakennuksen keskiosassa tai rakennuksen reunalla.

Betonin alkukosteuden kuivuminen rajattiin tämän työn tavoitteiden ulkopuolelle, ja tarkastelu aloitettiin tilanteesta, jossa betoni on kuivunut 85 %:n suhteelliseen kosteuteen ja päällystetty lattiapäällysteellä (Vinha 2014, s. 25). Kaikki tekijät valittiin edustamaan kosteusteknisen toimivuuden kannalta epäedullisinta tilannetta: Lattiapäällystemateriaalina käytettiin muovista lattiapäällystettä, jonka diffuusiovastuskerroin on 10 000, rakennetta tarkasteltiin rakennuksen keskiosassa, jossa maan lämpötila on korkein, ja lämmöneristepaksuutena käytettiin ohuinta U-arvovaatimukset täyttävää paksuutta 100 millimetriä.

Maanvastaisessa alapohjassa ei ole tuuletusväliä, joten tutkittavat fysikaaliset ilmiöt ovat lämmön- ja kosteudensiirto. Koska rakenteen toimintaa tarkastellaan rakennuksen keskiosassa, jossa olosuhteet ovat toimivuuden kannalta kriittisimmät, riittää yksiulotteinen tarkastelu kuvaamaan rakenteen toimintaa.

### 5.4.2 Geometria

Yksiulotteinen geometria koostuu eri materiaalikerrosten paksuutta kuvaavista intervaleista (kuva 24). Materiaalikerrokset vasemmalta oikealle ovat muovinen lattiapäällyste, betoni, EPS ja sora. Materiaalikerrosten paksuudet on esitetty kohdassa 5.4.5 taulukossa 11.



Kuva 24. Maanvastaisen alapohjan geometrian mallintaminen COMSOL Multiphysics -ohjelmassa.

### 5.4.3 Lämmön- ja kosteudensiirron mallintaminen

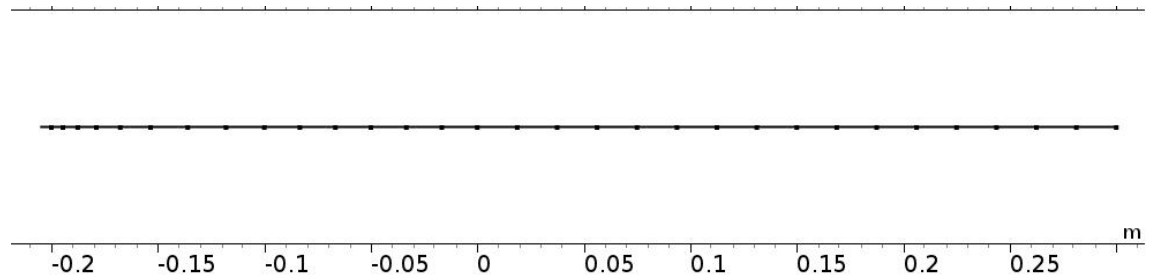
COMSOL Multiphysics -ohjelman Heat Transfer in Building Materials ja Moisture Transport in Building Materials -fysiikkamoduuleiden käyttämät osittaisdifferentiaaliyhtälöt (kaavat (33) ja (35)) on esitelty luvussa 3.4.

Maanvastaisen alapohjan laskentamallissa käytettiin sisäpuolisena reunaehtona konvektioreunaehto. Sisäilman lämpötila on 21 °C ja suhteellinen kosteus vaihtelee tunneittain liitteen 2 mukaisesti. Sisäpuolinen konvektiokerroin on 5,88 W/(m<sup>2</sup> K).

Sorakerroksen alapinnassa käytettiin reunaehtona vakio lämpötilaa 15 °C ja suhteellisen kosteuden arvoa 100 %. Arvot noudattavat Leivon ja Rantalan tutkimuksen (2002, s. 8 – 9) suositusta, jonka mukaan maanvastaisen alapohjan lämpö- ja kosteusteknisissä tarkasteluissa maanpohjan lämpötilaksi tulisi olettaa vähintään 15 °C ja suhteelliseksi kosteudeksi 100 %. Tutkimuksen mukaan maan lämpötila rakennuksen alla on 50 – 100 mm:n eristepaksuudella 12 – 15 °C. Lämpötila 15 °C edustaa siten kosteusteknisen toiminnan kannalta epäedullisinta tilannetta. Huomattavaa on, että arvo poikkeaa energialaskennassa käytettävästä laskentatavasta, jossa maaperän oletetaan olevan vakio lämpötilassa 7 °C yhden metrin syvyydessä (RakMK D3 2012, 4.3.2). Lämmön- ja kosteudensiirron mallintamiseen liittyvien parametrien arvot on esitetty kohdassa 5.4.5 taulukossa 11.

#### 5.4.4 Verkotus

Laskentaverkkona käytettiin COMSOL Multiphysics -ohjelman luomaa kuvan 25 mukaista verkkoa. Käytettäessä tätä harvempaa laskentaverkkoa laskentamalli ei saavuttanut konvergenssia.



Kuva 25. Maanvastaisen alapohjan laskentamallissa käytetty laskentaverkko.

#### 5.4.5 Parametrien arvot

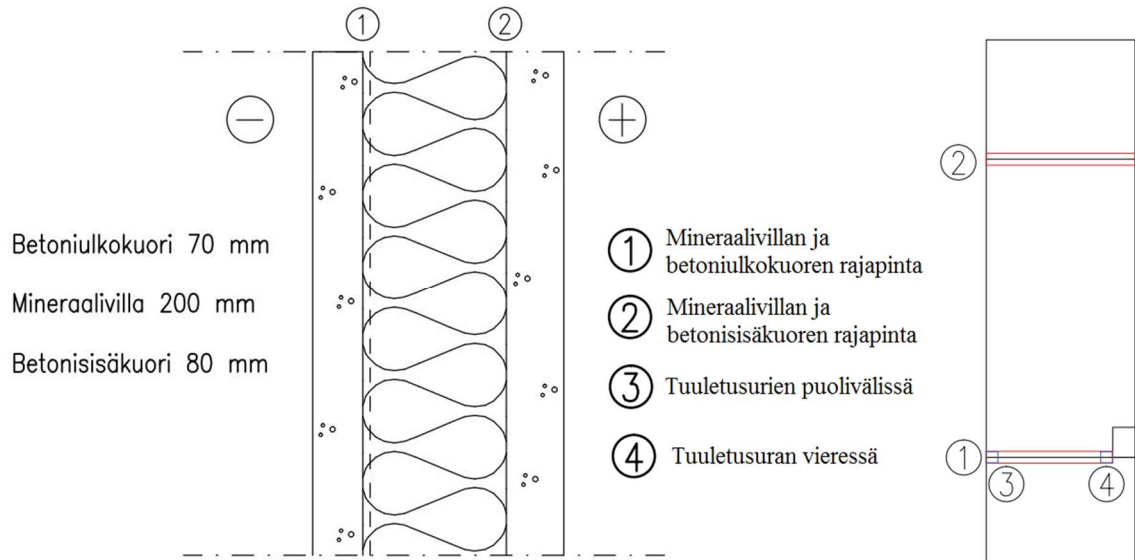
Taulukko 11. Maanvastaisen alapohjan laskennassa käytettyjen parametrien arvot.

selite	arvo	lähdeviite
lattiapäällysteen paksuus	5 mm	
betonilaatan paksuus	100 mm	
EPS:n paksuus	100 mm	
sorakerroksen paksuus	300 mm	
lämpötila sorakerroksen alapinnassa	15 °C	Leivo & Rantala 2002, s. 8 – 9
suhteellinen kosteus sorakerroksen alapinnassa	100 %	Leivo & Rantala 2002, s. 8 – 9
sisäpuolinen konvektiokerroin	5,88 W/(m <sup>2</sup> K)	RakMK C4 2003, s. 13
betonin suhteellinen kosteus alkutilanteessa	85 %	
soran suhteellinen kosteus alkutilanteessa	100 %	
eristeen ja lattiapäällysteen suhteellinen kosteus alkutilanteessa	90 %	
lattiapäällysteen ja betonin alkulämpötila	21 °C	
EPS:in ja soran alkulämpötila	15 °C	

## 6 Tutkimustulokset

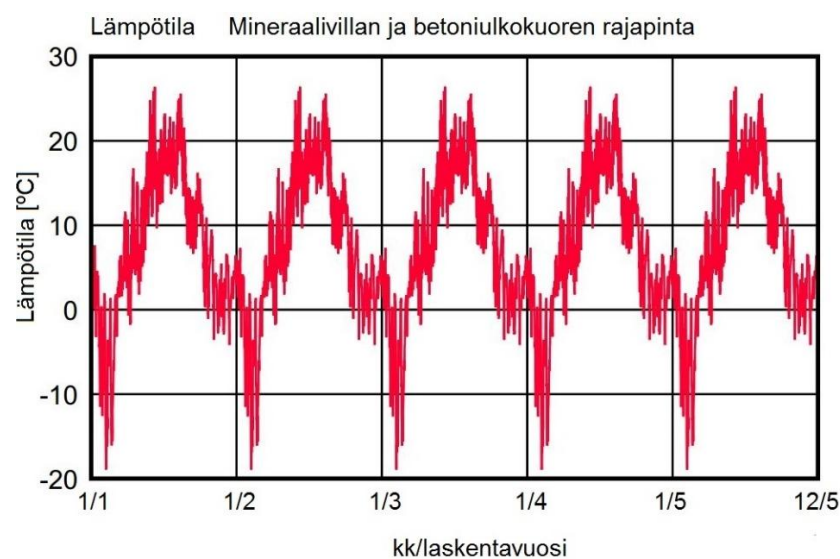
### 6.1 Betonisandwich-ulkoseinä

Mineraalivillalla eristetyin uratuuletetun betonisandwich-ulkoseinän rakennetyyppi on esitetty kuvassa 26. Kuvassa näkyvät myös alueet, joiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja on analysoitu. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot ovat annetuille alueille laskettuja keskiarvoja.

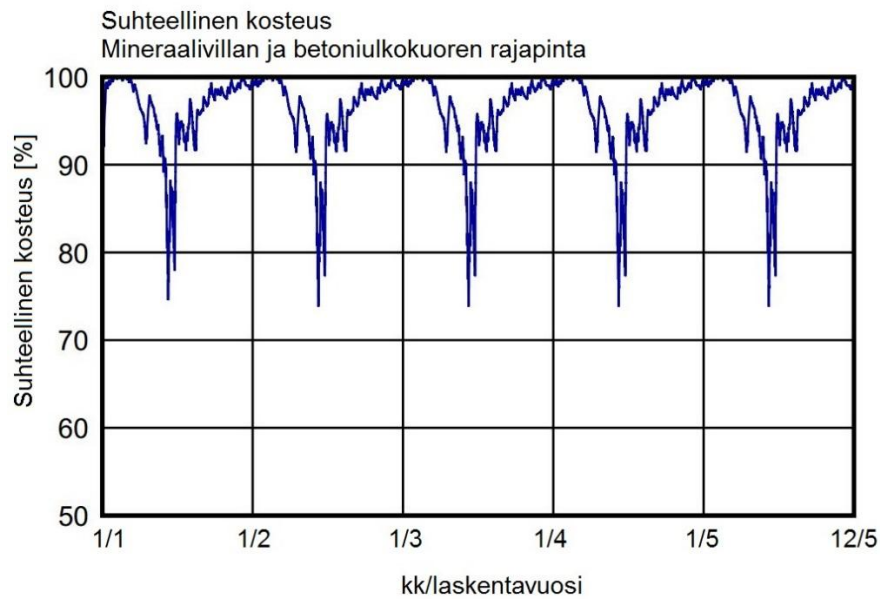


Kuva 26. Betonisandwich-ulkoseinän rakennetyyppi ja pinnat, joille tulokset on esitetty.

Mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnassa lämpötila on lähellä ulkoilman lämpötilaa (kuva 27). Laskentamallissa ei huomioitu pintaan kohdistuvaa auringon säteilyä. Kyseisen pinnan suhteellinen kosteus saa arvoja 90 – 100 % (kuva 28). Suhteellinen kosteus on alle 90 % vain keskikesällä. Suhteellisen kosteuden vaihtelu on viitenä laskentavuotena identtistä.



Kuva 27. Lämpötila mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnassa viiden vuoden aikana (WUFI® 2D).



Kuva 28. Suhteellinen kosteus mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnassa viiden vuoden aikana (WUFI® 2D).

Toisessa tarkastellussa rajapinnassa, mineraalivillan ja betonisisäkuoren rajapinnassa, lämpötila on lähellä sisäilman lämpötilaa (kuva 29). Suhteellinen kosteus vaihtelee talven matalimman arvon 22 % ja kesän korkeimman arvon 83 % välillä (kuva 30). Rajapinnan suhteellinen kosteus on vain hetkittäin yli 80 %. Suhteellisen kosteuden vaihtelu on ensimmäistä laskentavuotta seuraavina vuosina identtistä, mistä voidaan päätellä alkukosteuden poistuvan rakenteesta ensimmäisen vuoden aikana.

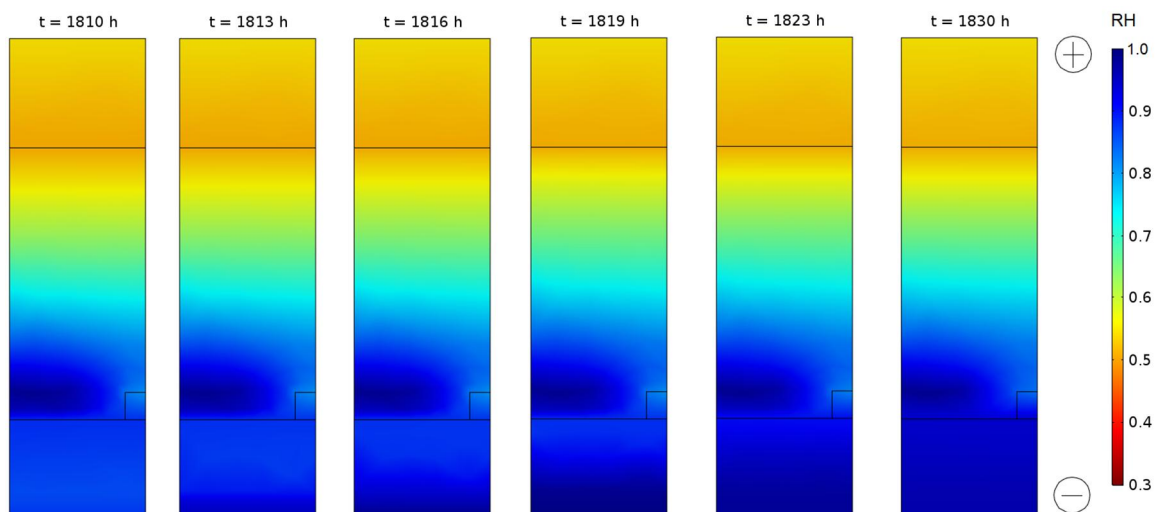


Kuva 29. Lämpötila mineraalivillan ja betonisisäkuoren rajapinnassa viiden vuoden aikana (WUFI® 2D).



Kuva 30. Suhteellinen kosteus mineraalivillan ja betonisisäkuoren rajapinnassa viiden vuoden aikana (WUFI® 2D).

Kuvassa 31 on kuvasarja betonisandwich-ulkoseinän kastumisesta sateen vaikutuksesta 17.3. ensimmäisenä laskentavuonna. Kuvassa oleva alue on seinän yläpää eli tuuletuksen poistoaukon puoleinen pää. Ulkopinta on kuvassa alhaalla ja sisäpinta ylhäällä. Sade alkaa ensimmäisen laskentavuoden maaliskuussa ajanhetkellä  $t = 1811$  h ja päättyy ajanhetkellä  $t = 1823$  h. Noin 12 tuntia kestävä sade kastelee betoniulkokuoren lähes kokonaan. Sateen jälkeen kosteuden jakaantuminen betonissa jatkuu. Kuvassa nähdään myös korkean suhteellisen kosteuden alue mineraalivillassa lähellä betoniulkokuorta tuuletusurien välissä.

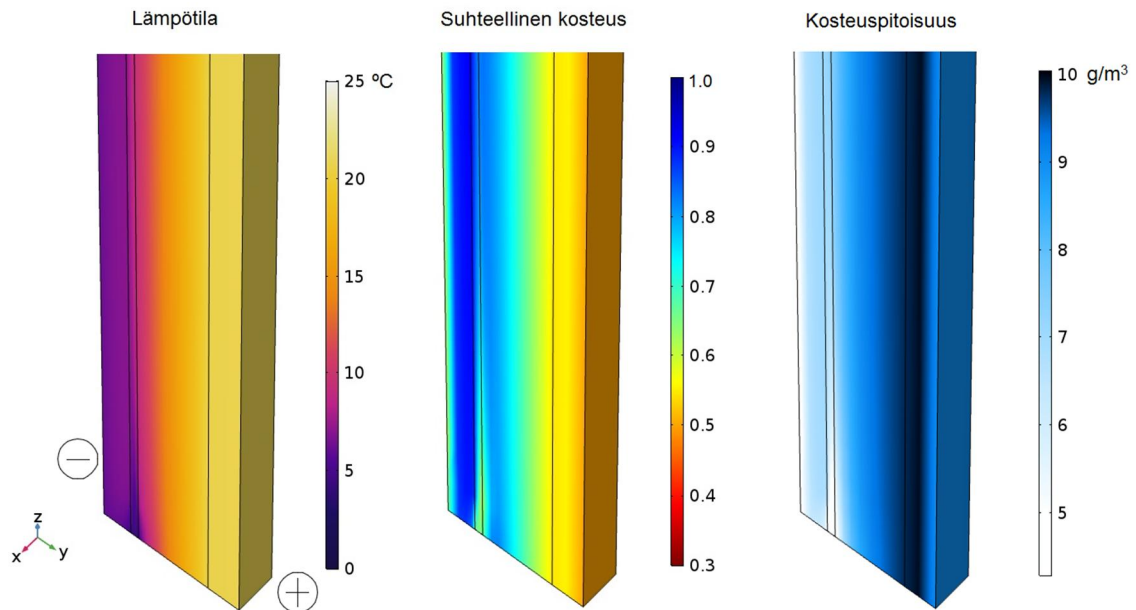


Kuva 31. Betonisandwich-ulkoseinän betoniulkokuoren kastuminen sateen vaikutuksesta ensimmäisen laskentavuoden maaliskuussa (COMSOL Multiphysics).

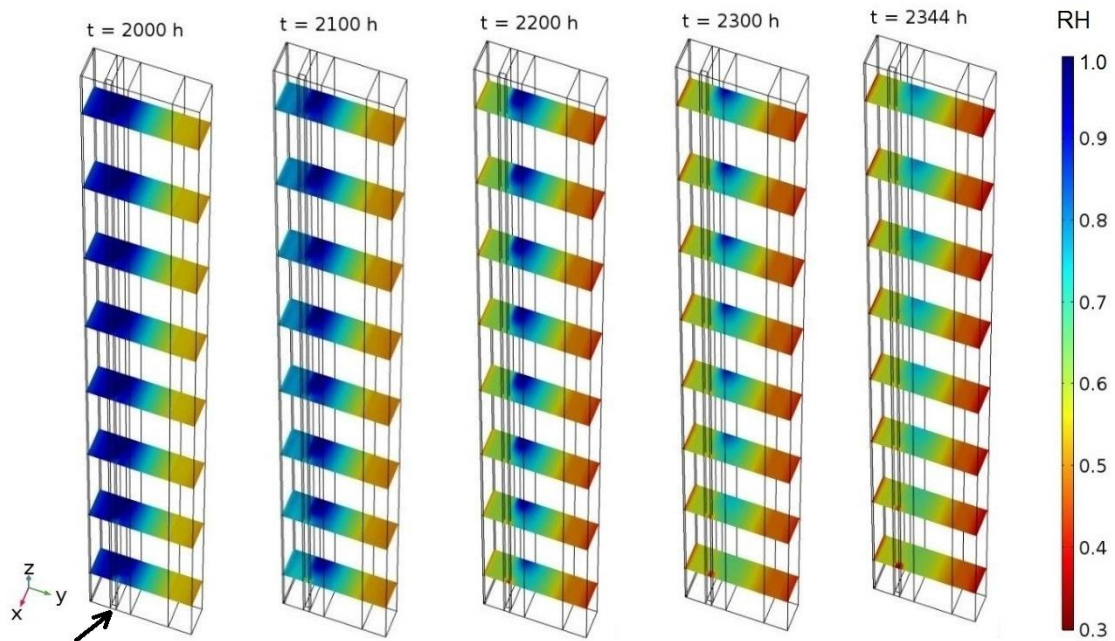
Kuvassa 32 on tarkasteltu tuuletusuran tuloaukon aluetta ajanhetkellä  $t = 1992$  h eli ensimmäisenä laskentavuonna 24.3. klo 23. Kuvan tulokset ovat laskentamallille, jossa ulkopinnan reunaehto ei sisällä viistosadekuormitusta. Kuvasta nähdään, että tuuletusilma saavuttaa tasapainotilan ympäröivien materiaalien kanssa jo noin puolen metrin korkeudella. Tuuletusilma on kuvan ajanhetkellä viileämpää ja kuivempaa kuin rakenne. Rakenteen ja



tuuletusilman välillä tapahtuu lämmön- ja kosteudensiirtoa vain niissä osissa rakennetta, jossa ilma ei ole tasapainossa ympäröivän rakenteen kanssa.



Kuva 32. Betonisandwich-ulkoseinän tuuletusuran tuloaukon alue ajanhetkellä  $t = 1992 \text{ h}$  (COMSOL Multiphysics). Tulokset ovat laskentamallille, jossa ulkopinnan reunaehto ei sisällä viistosadekuormitusta.

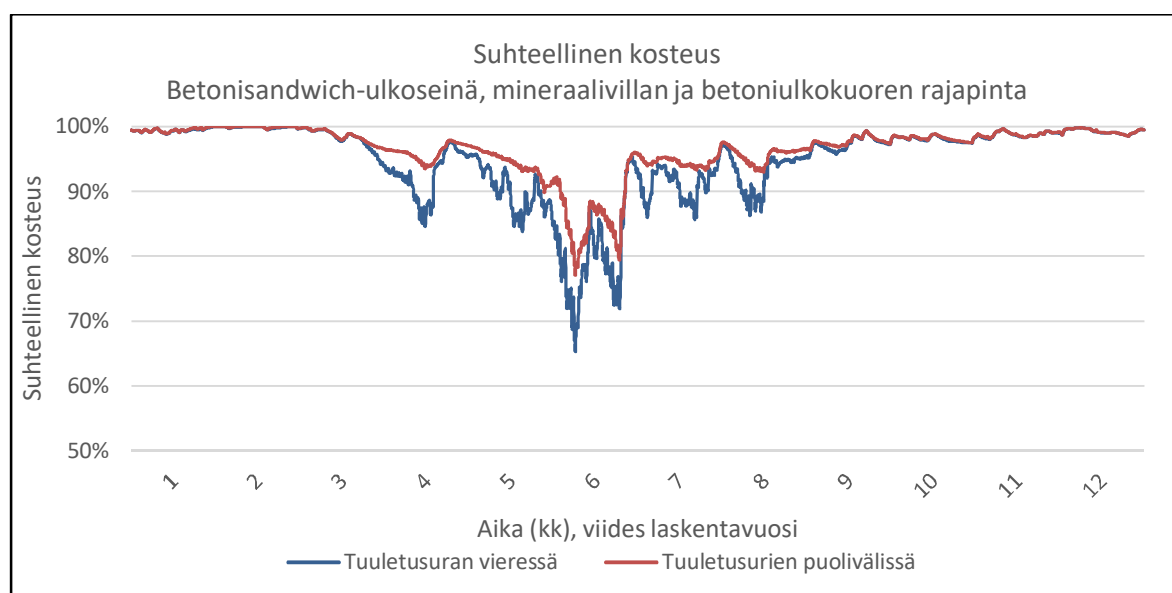


Kuva 33. Betonisandwich-ulkoseinän kuivuminen ensimmäisenä laskentavuonna välillä 25.3. – 8.4. (COMSOL Multiphysics). Kuvassa betoniulkokuori on vasemmalla ja tuuletusura nuolen osoittamassa kohdassa.

Kuvassa 33 on tarkasteltu betonisandwich-ulkoseinän kuivumista ensimmäisen laskentavuoden keväällä välillä 25.3. – 8.4. Kuvasarjassa betoniulkokuori on rakenteessa vasemmassa reunassa ja tuuletusura etualalla nuolen osoittamassa kohdassa. Ajanhetkellä  $t = 2000 \text{ h}$  betoniulkokuori on sateen jäljiltä märkä. Ulkoilman suhteellisen kosteuden

laskiessa betoniulkokuori kuivuu ulkopinnan läpi ulkoilmaan. Lisäksi tuuletus kuivattaa ulkokuoren puoleista osaa lämmöneristeestä. Tuuletusurien väliin jäävä alue kuivuu tuuletusuran ympäristöä hitaammin, mikä erottuu kuvasta kosteampana alueena rakenteen takaosassa. Rakenteen yläosa kuivuu alaosa hitaammin, koska tuuletusilma sitoo kosteutta ensimmäiseksi tuloaukon ympäristöstä.

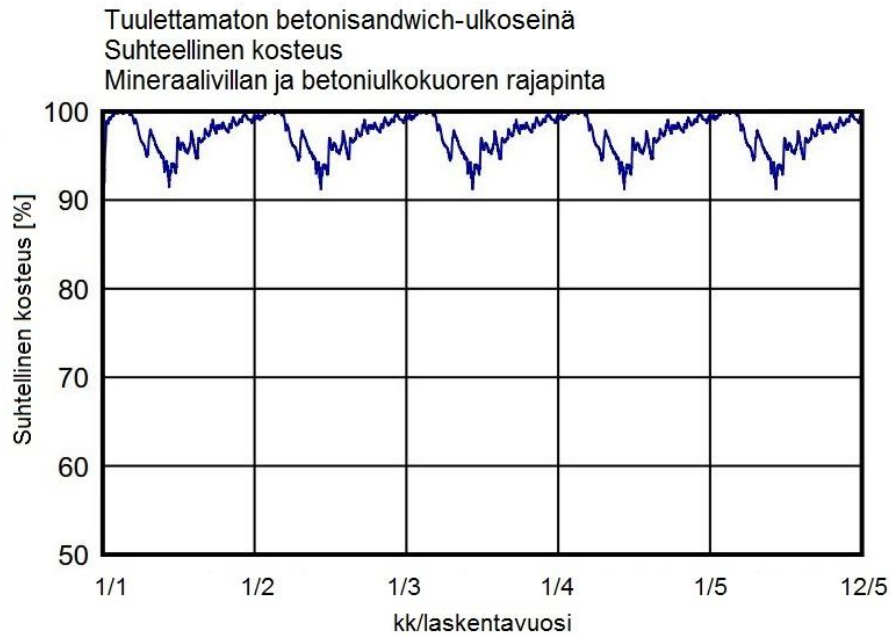
Kuvan 33 mukaisissa olosuhteissa rakenne kuivuu ensin tuuletusuran läheisyydestä ja joitakin päiviä myöhemmin tuuletusurien puolivälistä. Ilmiön analysoimiseksi tarkemmin tarkasteltiin suhteellisen kosteuden arvoja mineraalivillassa tuuletusuran vieressä ja tuuletusurien puolivälissä (alueet 3 ja 4 kuvassa 26). Kuvaajasta (kuva 34) käy ilmi, että ulkoilman suhteellisen kosteuden ollessa matala kuivuu tuuletusuran ympäristö tehokkaammin kuin tuuletusurien puoliväli. Talviolosuhteissa, kun ulkoilman suhteellinen kosteus on korkea, ovat molemmat tarkastellut pisteet lähellä 100 %:n suhteellista kosteutta.



Kuva 34. Suhteellinen kosteus mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnassa tuuletusuran vieressä ja tuuletusurien puolivälissä (WUFI® 2D).

Uratuuletuksen vaikutusta betonisandwich-ulkoseinän kosteustekniseen toimintaan tutkittiin lisäksi vertaamalla uratuuletettua rakennetta rakenteeseen, jossa mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnassa ei ole lainkaan tuuletusta. Tuulettamattomassa rakenteessa mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnan suhteellinen kosteus ei laske minään vuodenaikana alle 90 %:n (kuva 35). Näin ollen tuulettamaton rakenne on kesäolosuhteissa kosteampi kuin uratuuletettu rakenne, jossa kyseisen rajapinnan suhteellinen kosteus laskee kesän kuivimpina viikkoina alle 90 %:n (kuva 28). Talviolosuhteissa suhteellinen kosteus mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnassa on molemmissa rakenteissa lähellä kondensirajaa.

Tuuletuksen puuttuminen ei vaikuta mineraalivillan ja betonikuorten rajapintojen lämpötilaolosuhteisiin, vaan rajapintojen lämpötilat vaihtelevat molemmissa rakenteissa kuvien 27 ja 29 mukaisesti. Myöskään mineraalivillan ja betonisisäkuoren rajapinnan suhteellinen kosteudessa ei havaittu eroa tuulettamattoman ja uratuuletetun rakenteen välillä (kuvat 30 ja 36).



Kuva 35. Suhteellinen kosteus tuulettamattomassa betonisandwich-ulkoseinässä mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnassa viiden vuoden aikana (WUFI® 2D).



Kuva 36. Suhteellinen kosteus tuulettamattomassa betonisandwich-ulkoseinässä mineraalivillan ja betonisisäkuoren rajapinnassa viiden vuoden aikana (WUFI® 2D).

Betonisandwich-ulkoseinän tapauksessa perehdyttiin myös kysymykseen, miten eristepaksuus vaikuttaa rakenteen kuivumiskapasiteettiin. Kysymystä tarkasteltiin liitteessä 6 esitellyn käsinlaskuesimerkin avulla. Laskuesimerkki perustuu oletukseen, että suhteellinen kosteus tuuletusuran pinnoilla on 100 %. Laskennan tulokset on esitetty taulukoissa 12 ja 13.

*Taulukko 12. Eristepaksuuden vaikutus uritetulla mineraalivillalla eristetyin betonisandwich-ulkoseinän kuivumiskapasiteettiin ulko-olosuhteiden ollessa  $T = 5\text{ °C}$ ,  $RH = 80\%$  (liite 6).*

Eristepaksuus (mm)	Lämpötila tuuletusurassa (°C)	Kyllästysvaje (g/kg)	Kuivumiskapasiteetti (g/vrk)
100	5,52	1,28	12,0
150	5,36	1,22	11,4
200	5,27	1,19	11,1
250	5,22	1,17	10,9
300	5,19	1,15	10,8
350	5,16	1,14	10,7
400	5,14	1,13	10,6

*Taulukko 13. Eristepaksuuden vaikutus uritetulla mineraalivillalla eristetyin betonisandwich-ulkoseinän kuivumiskapasiteettiin ulko-olosuhteiden ollessa  $T = 15\text{ °C}$ ,  $RH = 80\%$  (liite 6).*

Eristepaksuus (mm)	Lämpötila tuuletusurassa (°C)	Kyllästysvaje (g/kg)	Kuivumiskapasiteetti (g/vrk)
100	15,19	2,27	21,2
150	15,13	2,23	20,8
200	15,10	2,20	20,6
250	15,08	2,19	20,4
300	15,07	2,18	20,3
350	15,06	2,17	20,3
400	15,05	2,17	20,2

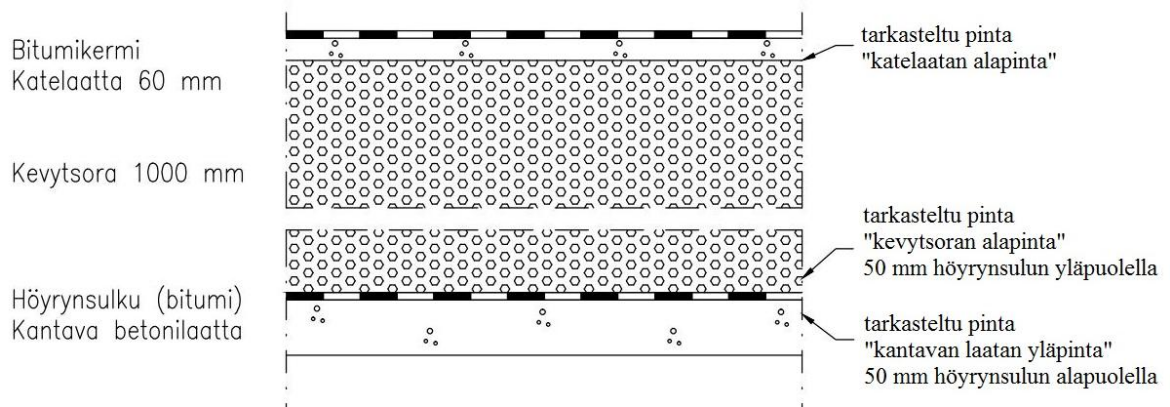
Esimerkkilaskun tulosten (taulukot 12 ja 13) valossa voidaan todeta eristepaksuudella olevan hyvin vähäinen vaikutus kuivumiskapasiteettiin. Kasvatettaessa eristepaksuutta esimerkiksi 150 millimetristä 250 millimetriin heikkenee kuivumiskapasiteetti  $5\text{ °C}$  lämpötilassa 4,3 % ja  $15\text{ °C}$  lämpötilassa 1,6 %. Vaikutus on vähäisempi kesäolosuhteissa, jolloin rakenteen kuivuminen pääasiassa tapahtuu.

## 6.2 Kevytsorakatto

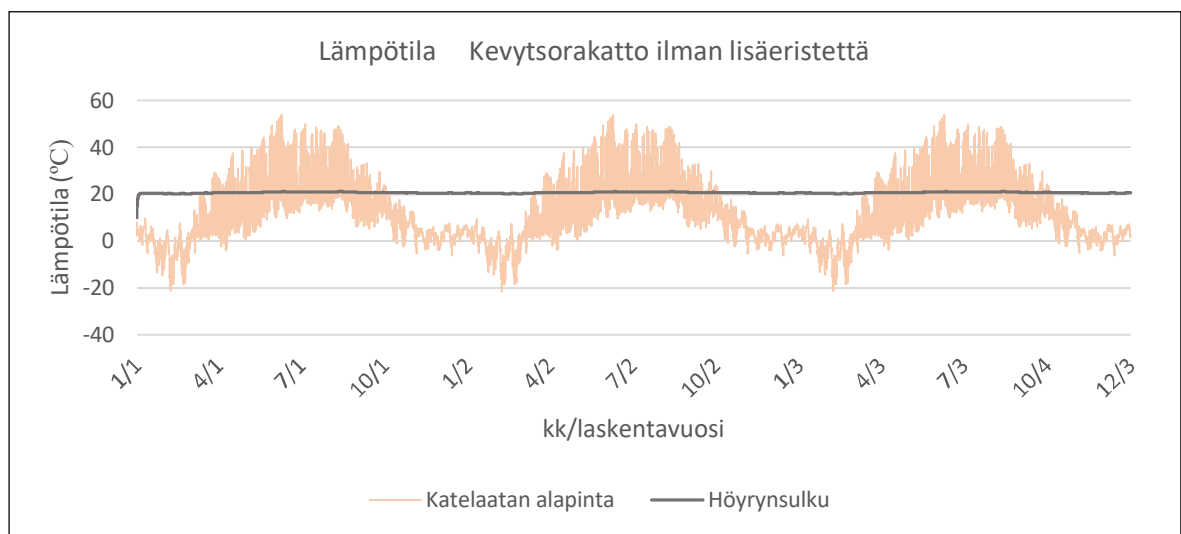
### 6.2.1 Kevytsorakatto ilman lisäeristettä

Tutkituista kevytsorakattorakenteista ensimmäinen oli perinteinen kevytsorakatto, jossa eristeenä käytetään pelkkää kevytsoraa. Kuvassa 37 on esitetty rakennetyyppi ja pinnat, joiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja analysoitiin.

Lämpötilakuvaajasta (kuva 38) nähdään, että eristekerroksen sisäpuolella sijaitsevan höyrynsulun lämpötila vastaa sisäilman lämpötilaa  $21\text{ °C}$  kaikkina vuodenaikoina. Kate-laatan alapinnan lämpötila vaihtelee talven  $-21\text{ °C}$ :n ja kesän  $54\text{ °C}$ :n ääriarvojen välillä. Keväällä ja kesällä auringon säteily nostaa bitumikerman ja katelaatan lämpötilaa.



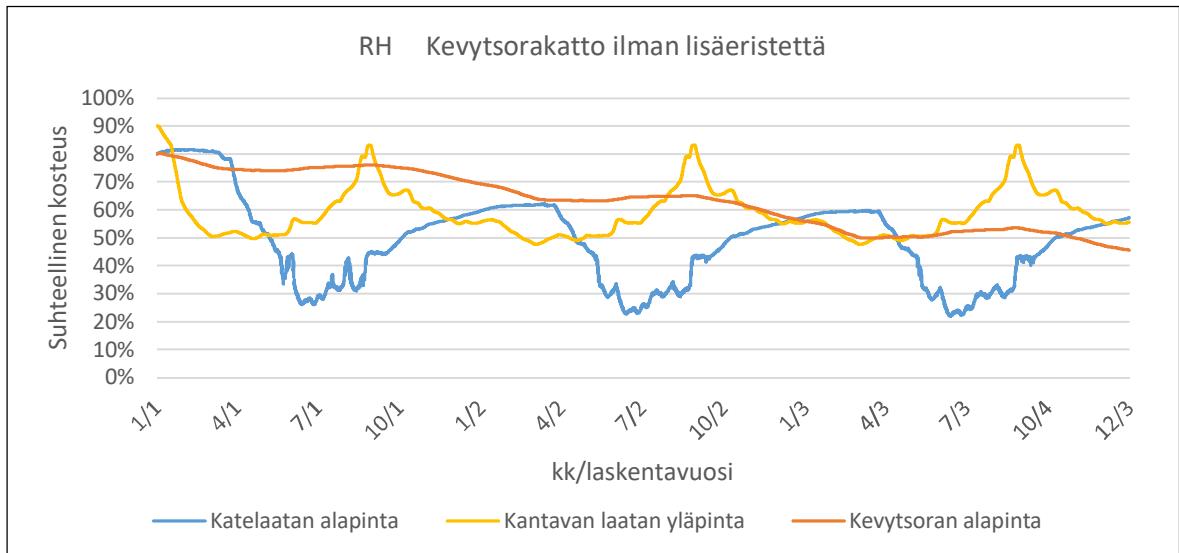
Kuva 37. Kevytsorakaton rakennetyyppi ja pinnat, joiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja analysoitiin.



Kuva 38. Lämpötila kevytsorakaton kahdessa rajapinnassa kolmen vuoden aikana.

Suhteellisen kosteuden kuvaajasta (kuva 39) käy ilmi, että yläpohjarakenteen eri osien suhteellinen kosteus vaihtelee vuodenaikojen mukaisesti toisistaan poikkeavilla tavoilla. Katelaatan alapinta edustaa talviolosuhteissa kriittistä rajapintaa, jonka suhteellinen kosteus nousee syksyn ja talven aikana. Käyttötilassa suhteellinen kosteus on kuitenkin aina alle 60 %. Keväällä ja kesällä aurinko lämmittää katelaattaa ja sen suhteellinen kosteus on matala, 22 %.

Suhteellisen kosteuden kuvaajasta (kuva 39) nähdään myös, että kantavan laatan ja kevytsoran välinen höyrynsulku toimii tehokkaana kosteuseristeenä, sillä kevytsoran alapinnan ja kantavan laatan yläpinnan suhteelliset kosteuden muuttuvat toisistaan riippumattomina. Kantava laatta reagoi sisäilman suhteelliseen kosteuteen, joka on kesällä korkea ja talvella matala. Kevytsoran alapinnan suhteellisen kosteuden suuntaus on kolmen laskentavuoden aikana laskeva. Kolmannen vuoden suhteellisen kosteuden keskiarvo kyseisessä pinnassa on 51 %, kun alkukosteus oli 80 %. Kevytsoran alapinnan suhteellinen kosteus pienenee talvi-kuukausina ja kasvaa hieman kesäkuukausina.



Kuva 39. Suhteellinen kosteus kevytsorakaton kolmessa rajapinnassa kolmen vuoden aikana.

Kuvissa 40, 41 ja 42 esitettyjen laskennan tulosten perusteella voidaan analysoida rakenteen absoluuttista kosteuspitoisuutta ja tuuletuksen vaikutusta rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Kuvassa 40 on esitetty kosteuspitoisuuden keskiarvo höyrynsulun yläpuolisissa kerroksissa eli kevytsorassa, tuuletusilmassa ja katelaatassa. Kosteuspitoisuuden laskentaan käytettiin kaavaa (50) (COMSOL Multiphysics 5.3, s. 73 – 75).

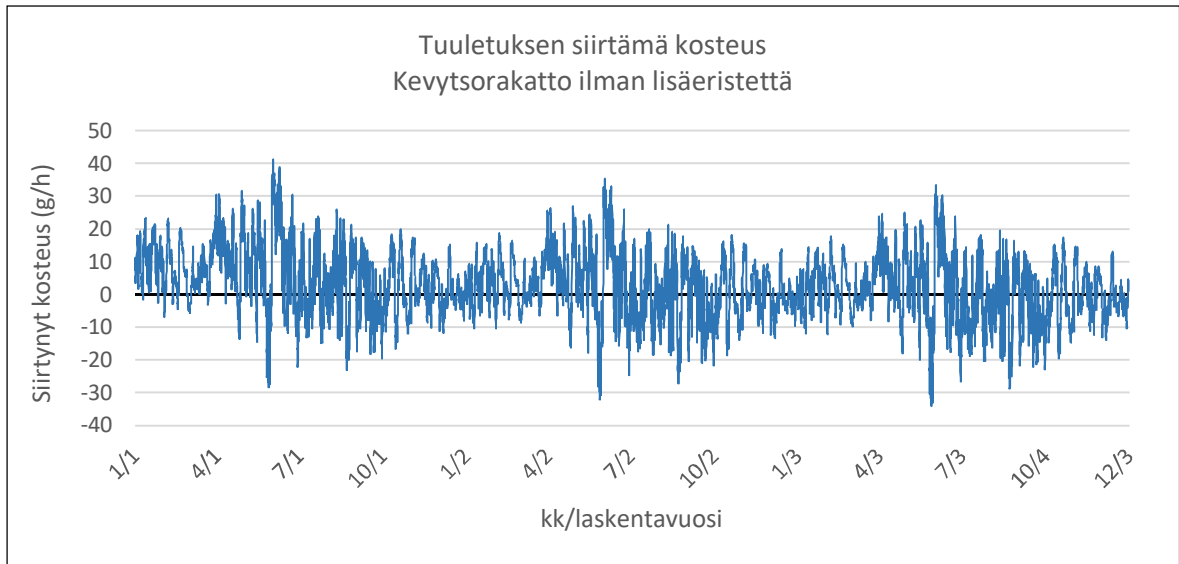
$$\dot{w} = M_v \cdot c_v \quad (50)$$

missä  $w$  on kosteuspitoisuus [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $M_v$  on veden moolimassa [ $\text{kg}/\text{mol}$ ]  
 $c_v$  on vesihöyryn konsentraatio [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ]

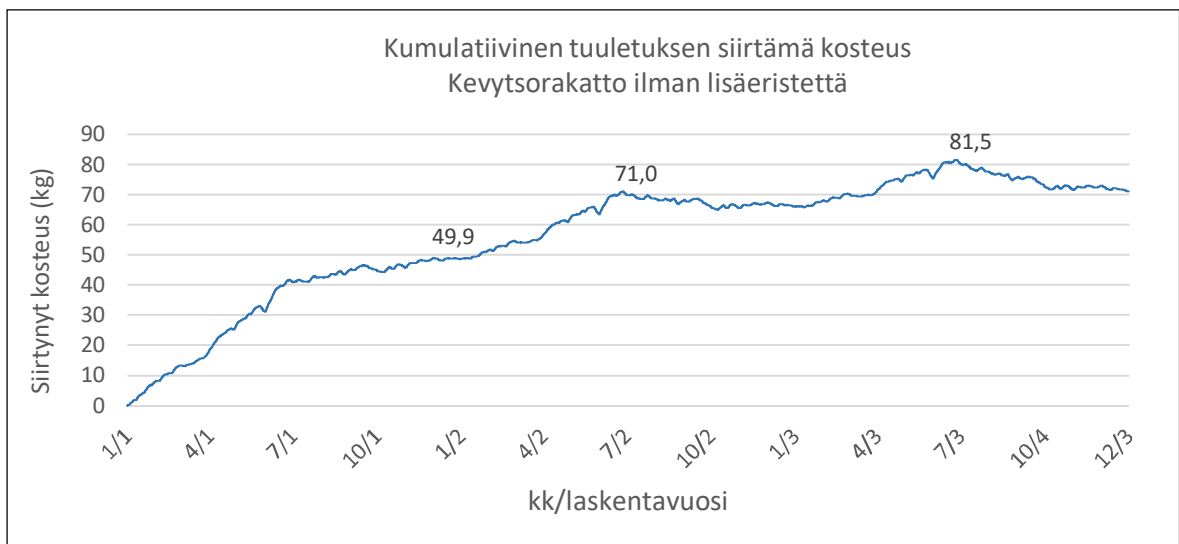


Kuva 40. Kosteuspitoisuuden keskiarvo kevytsorakaton höyrynsulun yläpuolisissa kerroksissa kolmen vuoden aikana.

Kuvassa 41 on tuuletuksen poistama kosteus tunneittain ja kuvassa 42 kumulatiivisesti laskennan alusta alkaen. Kuvan 41 negatiiviset arvot merkitsevät, että tuuletus tuo rakenteeseen kosteutta. Tulosten perusteella voidaan tehdä johtopäätös, että tuuletus poistaa kosteutta rakenteesta aina vuoden ensimmäisellä puoliskolla. Loppukesällä ja syksyllä tuuletus sen sijaan tuo rakenteeseen kosteutta. Tähän on syynä ulkoilman korkea absoluuttinen kosteus kesällä. Kolmen ensimmäisen vuoden suuntaus on, että kosteutta poistuu rakenteesta. Alkukosteus poistuu rakenteesta pääosin ensimmäisen vuoden aikana.



*Kuva 41. Tuuletuksen siirtämä kosteus kolmen vuoden aikana. Positiivinen suunta on rakenteesta ulkoilmaan.*



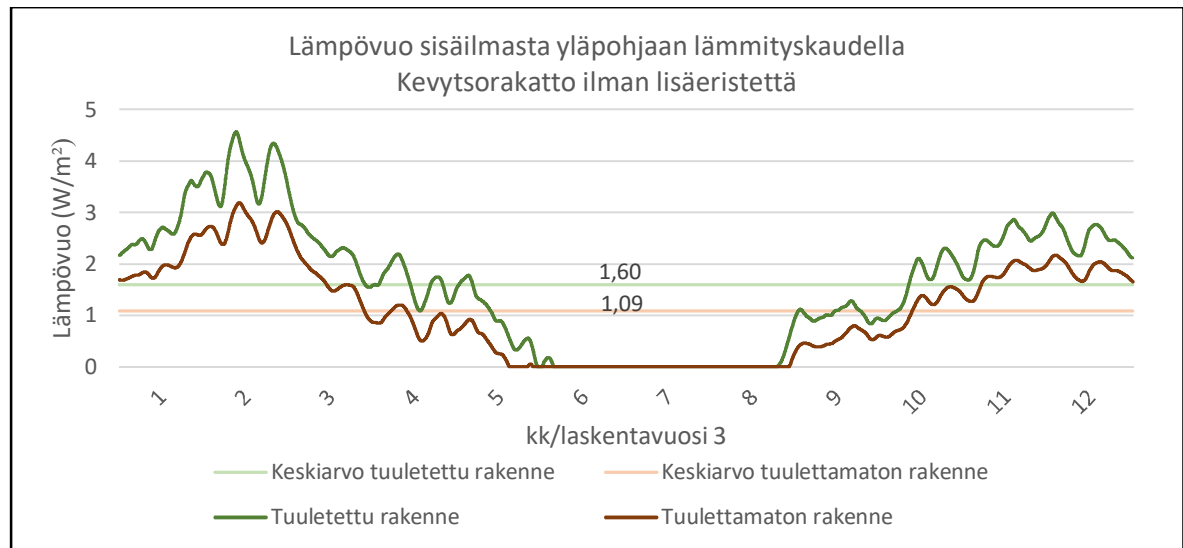
*Kuva 42. Kumulatiivinen tuuletuksen siirtämä kosteus kolmen vuoden aikana. Positiivinen suunta on rakenteesta ulkoilmaan.*

Rakenteen kosteusteknisen toimivuuden lisäksi tarkasteltiin tuuletuksen vaikutusta lämpöhäviöön rakenteen läpi. Tätä tarkoitusta varten vertailtiin lämpövuota rakenteen sisäpinnan läpi, kun rakenne on tuuletettu ja tuulettamaton (kuva 43). Tuulettamaton rakenne ratkaistiin asettamalla tuuletusilman nopeudeksi 0 m/s ja määrittämällä sekä tulo- että



poistoaukon reunaehdoksi symmetriareunaehto. Lämpövuota tarkasteltiin vain lämmityskaudella, eli kesäkuukausien ajalle lämpövuolle annettiin arvo  $0 \text{ W/m}^2$ . Kyseinen muokkaus koskee vain lämpövuon laskentaa, ja sen avulla otettiin huomioon, ettei lämmitystä kytketä kesäkuukausina päälle, vaikka vähäiselle lämmitykselle olisi laskennallisesti tarvetta.

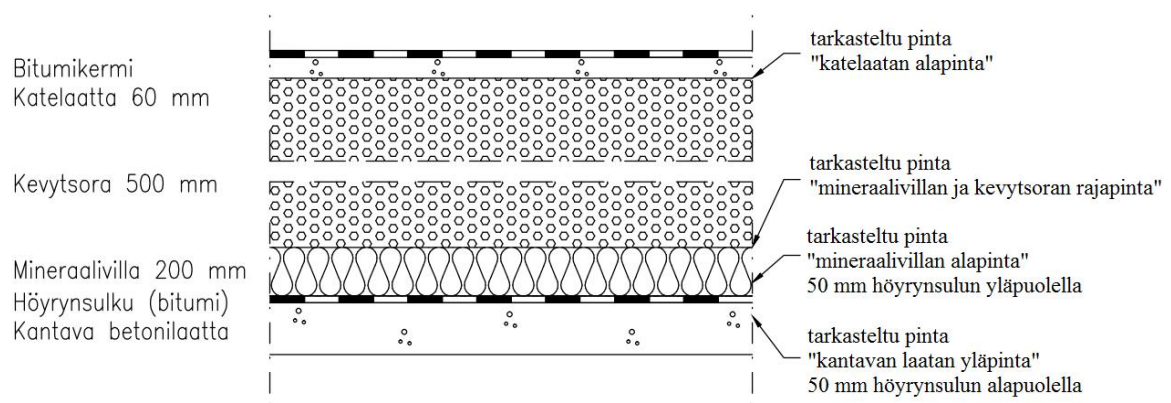
Laskentatulokset osoittavat, että rakenteen tuuletus kasvattaa lämpöhäviötä rakenteen läpi 47 %. Ulkoilman lämpötilassa rakenteeseen tuleva tuuletusilma viilentää rakennetta tuloaukon läheisyydessä. Tämä kasvattaa lämpövuota yläpohjan läpi tuulen puoleisella puolella rakennusta. Kevytsorakaton tapauksessa tuuletus aiheuttaa erittäin merkittävän lisän lämpöhäviöön, koska ilma virtaa koko kevytsorakerroksessa.



Kuva 43. Lämpövuoto sisäilmasta rakenteeseen lämmityskaudella.

## 6.2.2 Mineraalivillalla lisäeristetty kevytsorakatto

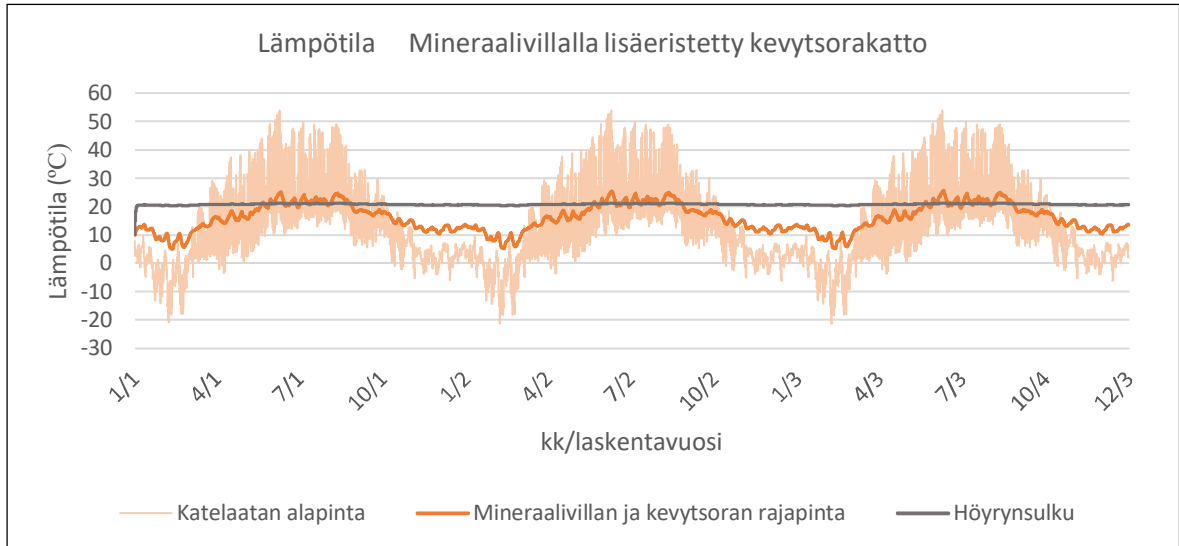
Kevytsorakatosta tutkittiin laskennallisesti myös rakennetyyppejä, jossa osa kevytsorasta on korvattu mineraalivillalla. Mineraalivillaa käyttämällä voidaan pienentää rakenteen kokonaispaksuutta. Rakennetyyppi on esitetty kuvassa 44. Kuvassa on lisäksi esitetty pinnat, joiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja analysoitiin.



Kuva 44. Mineraalivillalla lisäeristetyn kevytsorakaton rakennetyyppi ja pinnat, joille tulokset on esitetty.

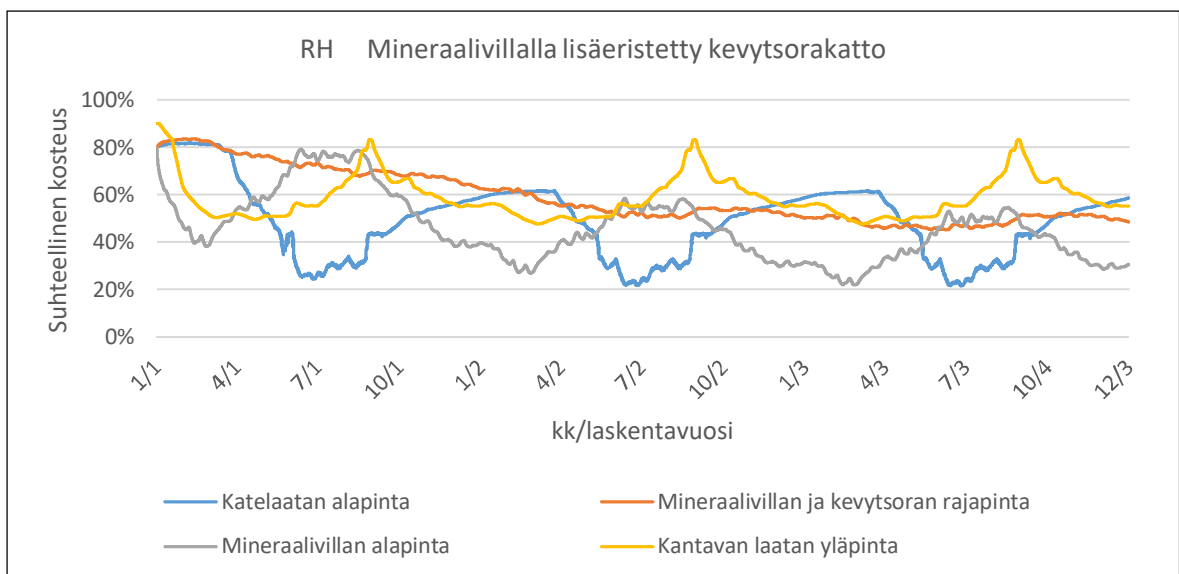


Mineraalivillalla lisäeristetyssä kevytsorakatossa katelaatan alapinnan ja höyrynsulun lämpötilat eivät eroa edellä käsitellyn pelkällä kevytsoralla eristetyn rakenteen lämpötiloista (kuva 45). Auringon aiheuttamat lämpötilapiikit eivät lämmitä rakennetta pintaa syvemmälle, vaan mineraalivillan ja kevytsoran rajapinnan lämpötila on kesäolosuhteissa korkeimmillaan 26 °C.



Kuva 45. Lämpötila mineraalivillalla lisäeristetyn kevytsorakatton kolmessa rajapinnassa kolmen vuoden aikana.

Mineraalivillan alapinnan suhteellisen kosteuden arvoista (kuva 46) käy ilmi, että alkukosteutta poistuu ensimmäisen vuoden aikana. Rajakerroksen suhteellinen kosteus on ensimmäisenä kesänä korkeimmillaan 79 %, toisena kesänä 58 % ja kolmantena kesänä 54 %. Rajakerroksen suhteellinen kosteus on korkeimmillaan kesällä, koska tuuletusilma tuo kesäisin ja alkusyksystä kosteutta rakenteeseen.

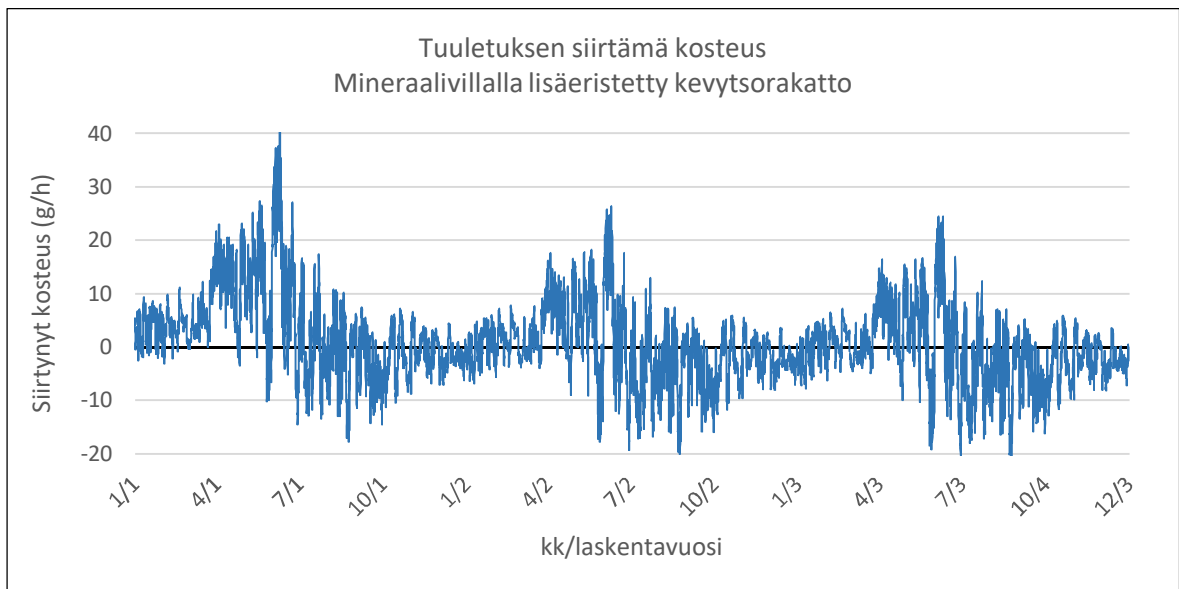


Kuva 46. Suhteellinen kosteus mineraalivillalla lisäeristetyn kevytsorakatton neljässä rajapinnassa kolmen vuoden aikana.

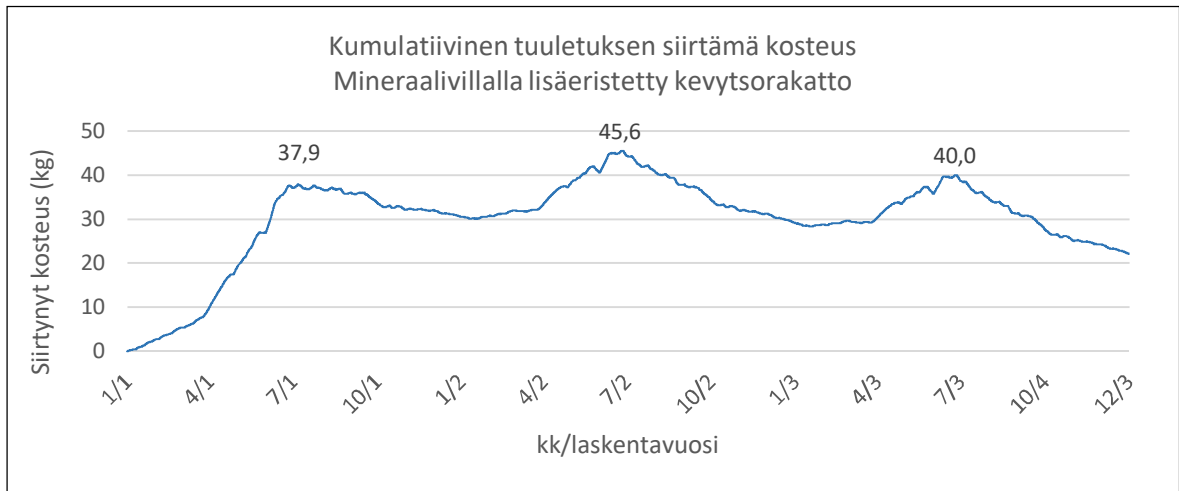
Kosteuspitoisuuden kuvaajasta (kuva 47) havaitaan, että rakenteen höyrynsulun yläpuoliset kerrokset eli mineraalivilla, kevytsora, tuuletusilma ja katelaatta ovat absoluuttisella kosteudella mitattuna kosteampia kesällä kuin talvella. Tuuletuksen poistaman kosteuden kuvaajista nähdään, että tuuletus tuo rakenteeseen kosteutta kesällä ja alkusyksystä ja poistaa sitä keväisin (kuvat 48 ja 49). Alkukosteus poistuu rakenteesta ensimmäisen vuoden aikana, minkä jälkeen sekä suhteellisen että absoluuttisen kosteuden vaihtelut seuraavat vuoden-aikoja.



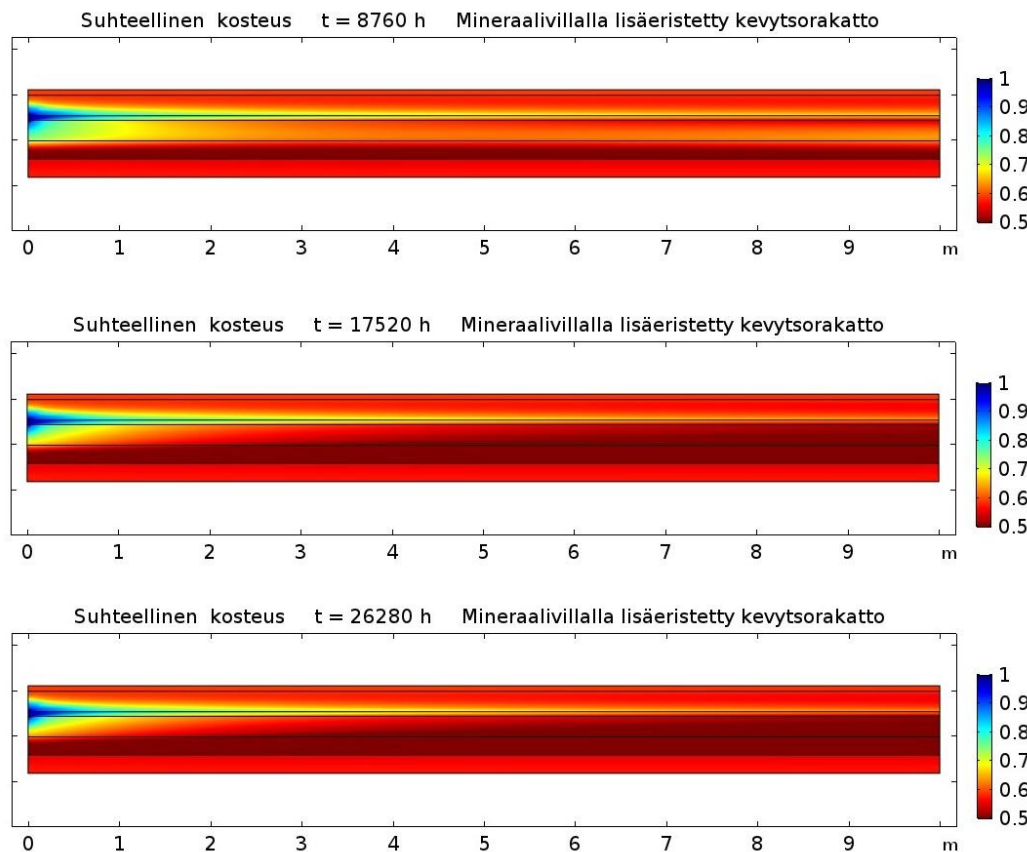
Kuva 47. Kosteuspitoisuuden keskiarvo mineraalivillalla lisäeristetyin kevytsorakaton höyrynsulun yläpuolisissa kerroksissa kolmen vuoden aikana.



Kuva 48. Tuuletuksen siirtämä kosteus kolmen vuoden aikana. Positiivinen suunta on rakenteesta ulkoilmaan.



Kuva 49. Kumulatiivinen tuuletuksen siirtämä kosteus kolmen vuoden aikana. Positiivinen suunta on rakenteesta ulkoilmaan.



Kuva 50. Suhteellisen kosteuden jakauma mineraalivillalla lisäeristetyssä kevytsorakatossa kolmen laskentavuoden viimeisinä tunteina.

Rakenteen kuivumista on havainnollistettu kuvassa 50, joka sisältää suhteellisen kosteuden jakauman rakenteessa vuoden viimeisinä tunteina kolmena laskentavuotena. Toisen vuoden viimeisenä tuntina rakenne on kuivempi kuin ensimmäisen vuoden viimeisenä tuntina. Kolmannen vuoden viimeisenä tuntina rakenteen suhteellinen kosteus on kuitenkin hyvin lähellä toisen vuoden viimeisen tunnin tilannetta. Tästä voidaan päätellä, että kolmas

laskentavuosi kuvastaa rakenteen olosuhteita käyttötilassa riittävällä tarkkuudella, eikä laskentaa ole tarpeen jatkaa pidemmälle aikavälille.

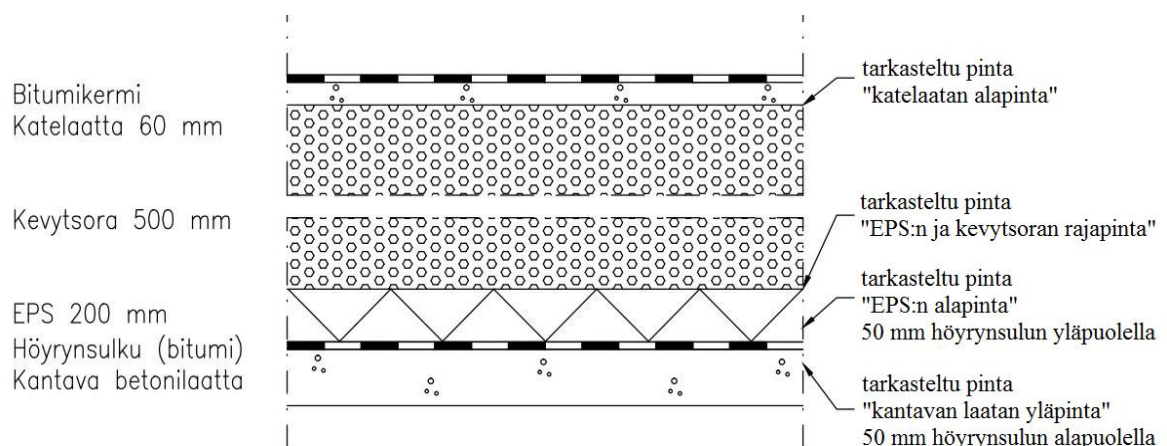
Rakenteen kosteusteknisen toimivuuden lisäksi tarkasteltiin myös tuuletuksen vaikutusta lämpöhäviöön yläpohjarakenteen läpi. Tarkastelu suoritettiin vastaavalla tavalla kuin luvussa 6.2.1 on tehty pelkällä kevytsoralla eristetylle yläpohjarakenteelle. Tarkastelussa lämpövuon arvoksi kesäkautena asetettiin  $0 \text{ W/m}^2$ , eli lämpövuota tarkasteltiin vain lämmityskautena. Mineraalivillalla lisäeristetyin kevytsorakaton tapauksessa rakenteen tuuletus aiheuttaa 12 % lisän lämpövuohon verrattuna tuulettamattomaan rakenteeseen (kuva 51).



Kuva 51. Lämpövuoto sisäilmasta rakenteeseen lämmityskaudella.

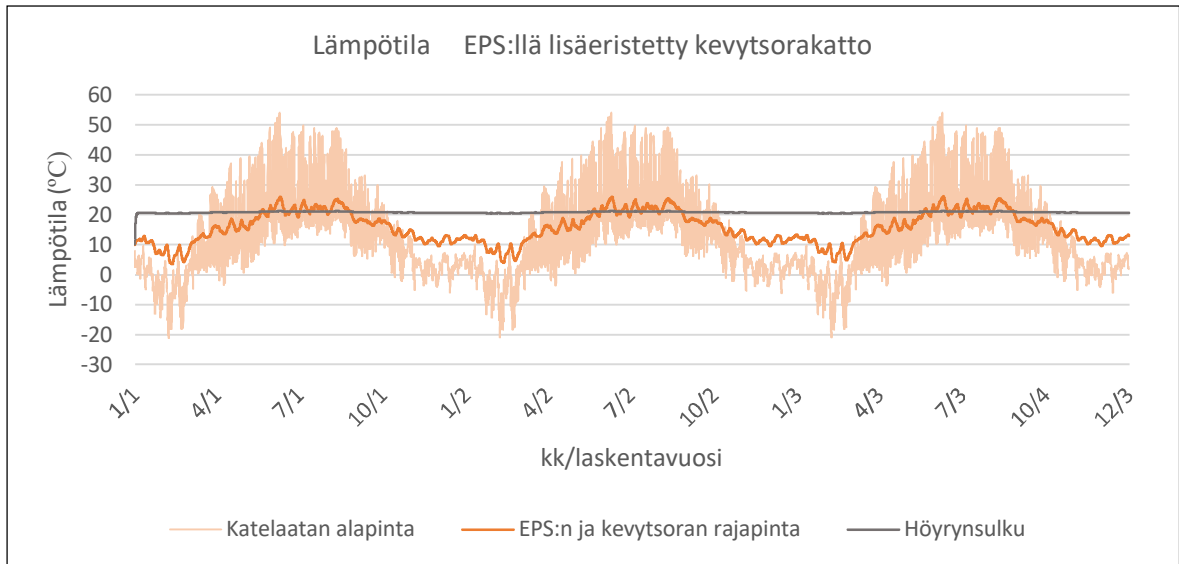
### 6.2.3 EPS:llä lisäeristetty kevytsorakatto

Kolmantena yläpohjatyypinä tutkittiin EPS:llä lisäeristettyä kevytsorakattoa. Katon rakennetyyppi ja pinnat, joille lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot on annettu, on esitetty kuvassa 52.

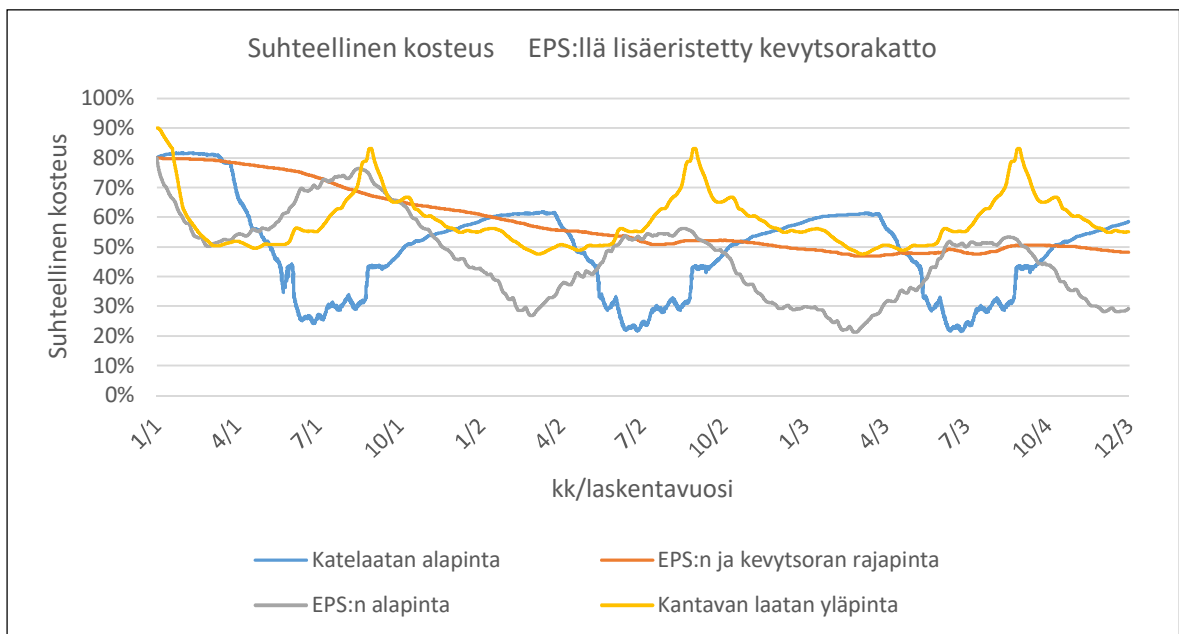


Kuva 52. EPS:llä lisäeristetyin kevytsorakaton rakennetyyppi ja pinnat, joille tulokset on esitetty.

Tulosten perusteella EPS:llä lisäeristetyin kevytsorakaton lämpö- ja kosteusolosuhteet ovat erittäin lähellä mineraalivillalla lisäeristetyin kevytsorakaton olosuhteita. Vertaamalla lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuvaajia (kuvat 45 ja 53 sekä 46 ja 54) nähdään, että merkittävin ero rakenteiden välillä on EPS:n ja mineraalivillan alapintojen suhteellisen kosteuden kasvu alkukesästä. Tuuletuksen rakenteeseen tuoma kosteus siirtyy diffuusiolla höyrynsulkua kohti hieman hitaammin EPS:n kuin mineraalivillan läpi, koska EPS:llä on korkeampi diffuusiovastuskerroin.



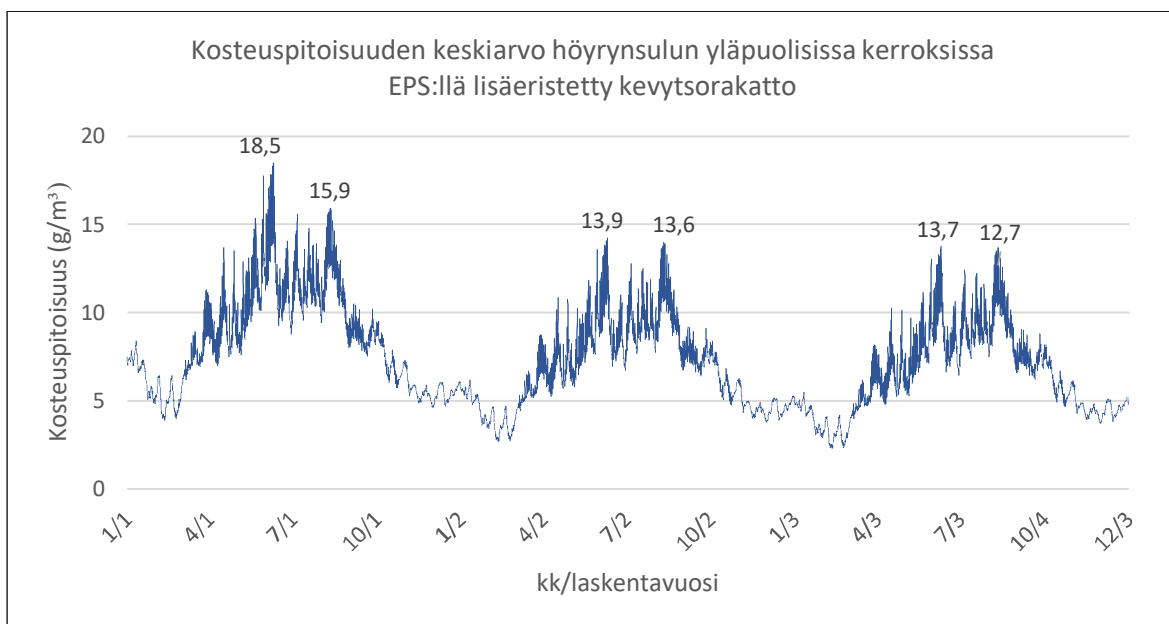
Kuva 53. Lämpötila EPS:llä lisäeristetyin kevytsorakaton kolmessa rajapinnassa kolmen vuoden aikana.



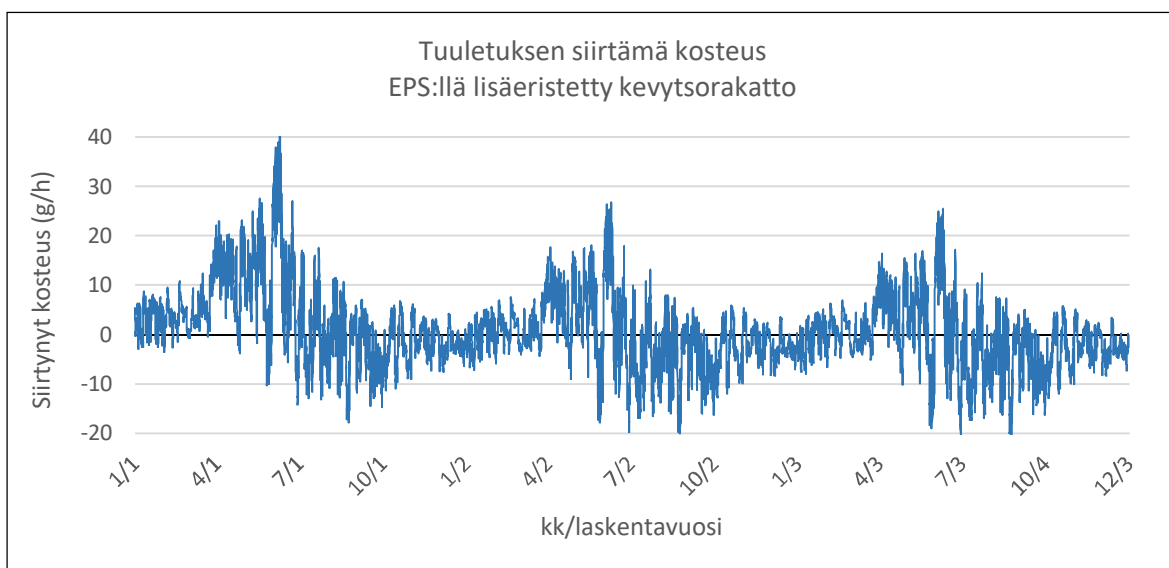
Kuva 54. Suhteellinen kosteus EPS:llä lisäeristetyin kevytsorakaton neljässä rajapinnassa kolmen vuoden aikana.

Kosteuspitoisuuden kuvaajasta (kuva 55) voidaan havaita, että alkukosteus poistuu rakenteesta ensimmäisen vuoden aikana, minkä jälkeen rakenne on käyttötilassa ja kosteuspitoisuus vaihtelee vuodenaikojen mukaisesti. Sama voidaan nähdä tuuletuksen poistaman

kosteuden kuvaajista (kuvat 56 ja 57). Ensimmäisen vuoden jälkeen tuuletus ei poista kosteutta kumulatiivisesti, vaan tuuletus joko poistaa tai tuo kosteutta rakenteeseen vuoden-aikojen mukaisesti. Alkukosteutta poistuu rakenteesta noin 30 kg tuuletuspituuden (10 m) matkalta, eli noin 3 kg/m<sup>2</sup>.

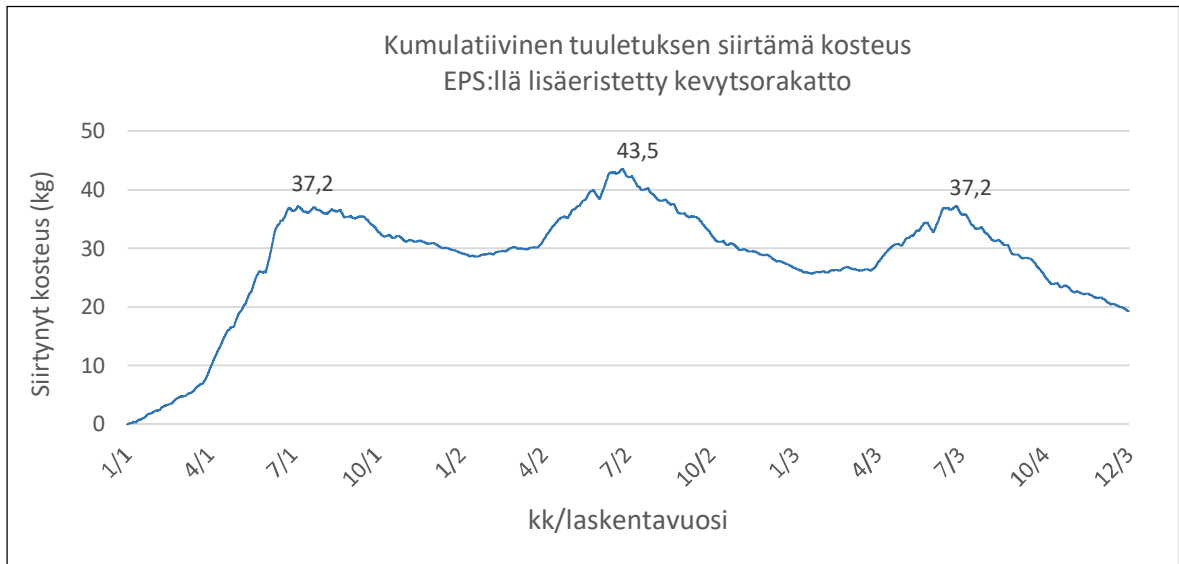


Kuva 55. Kosteuspitoisuuden keskiarvo EPS:llä lisäeristetyn kevytsorakaton höyrynsulun yläpuolisissa kerroksissa kolmen vuoden aikana.



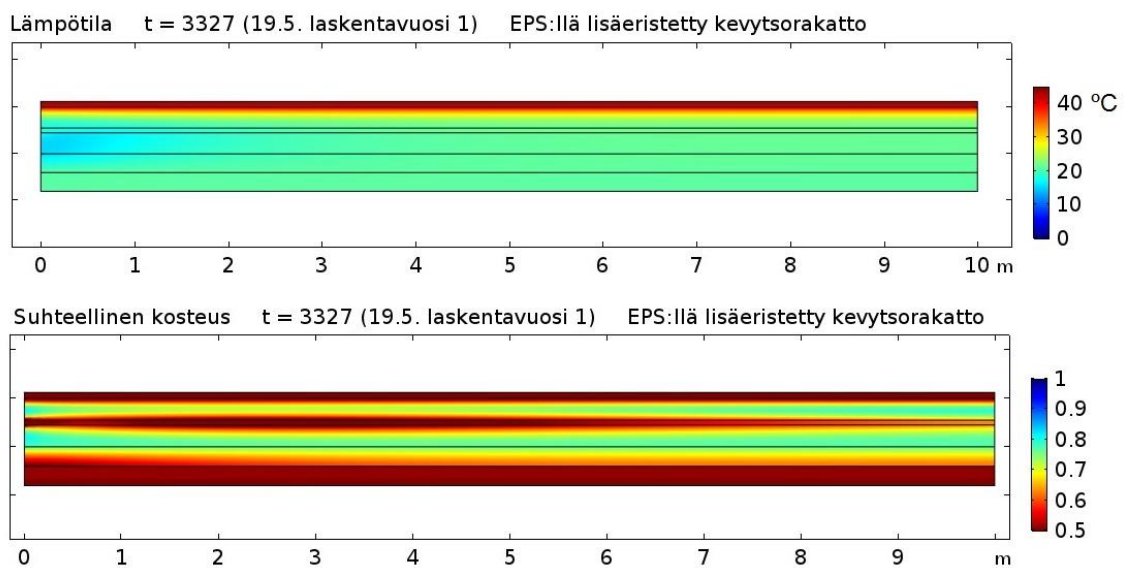
Kuva 56. Tuuletuksen siirtämä kosteus kolmen vuoden aikana. Positiivinen suunta on rakenteesta ulkoilmaan.

Sekä mineraalivillalla että EPS:llä lisäeristettyjen kevytsorakattojen tuloksista (kuvat 49 ja 57) havaittiin, että tuuletusilma tuo rakenteeseen kosteutta kolmannen laskentavuoden aikana. Työn puitteissa jäi epäselväksi, mistä ilmiö johtuu. Ilmiön tutkimiseksi tulisi laskenta suorittaa pidemmälle ajanjaksolle ja laskea myös kosteusvuot höyrynsulun ja bitumikermin läpi.



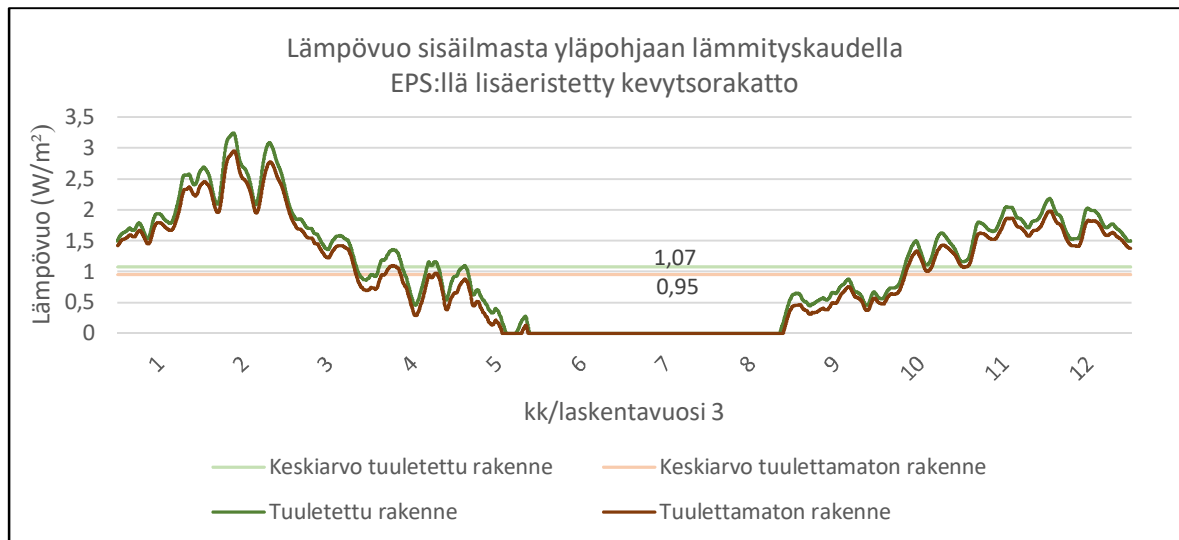
Kuva 57. Kumulatiivinen tuuletuksen siirtämä kosteus kolmen vuoden aikana. Positiivinen suunta on rakenteesta ulkoilmaan.

Kuvassa 58 on esitetty lämpötilan ja suhteellisen kosteuden jakaumat rakenteessa ajanhetkenä, jolloin auringon säteily lämmittää rakennetta. Auringon säteily nostaa katelaatan lämpötilaa, minkä seurauksena sen suhteellinen kosteus on matala. Kuvasta nähdään myös, kuinka kuiva tuuletusilma kuivattaa rakennetta. Rakenteen tuloaukon puoleinen osa kuivuu poistoaukon puoleista osaa enemmän.



Kuva 58. EPS:llä lisäeristetyn kevytsorakaton lämpötilan ja suhteellisen kosteuden jakaumat aurinkoisella säällä toukokuussa.

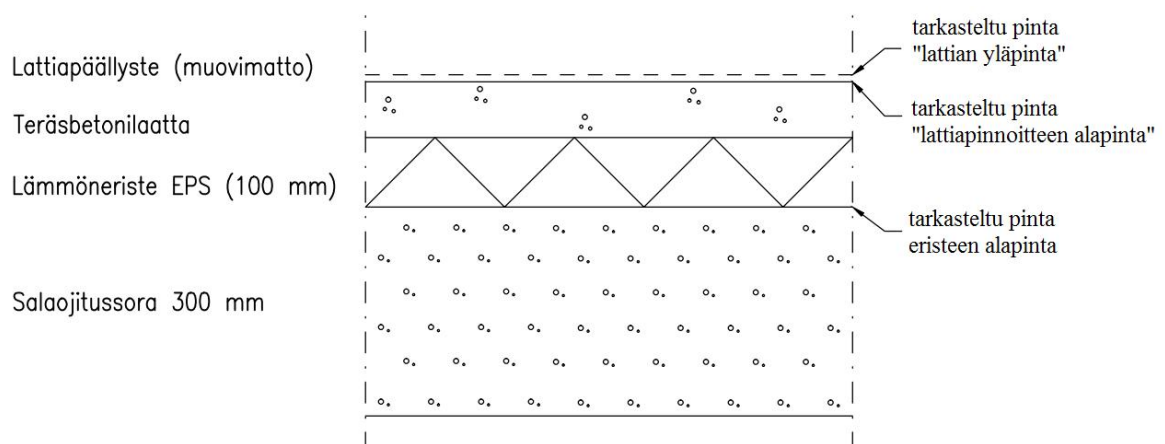
Kosteusteknisen toimivuuden lisäksi tarkasteltiin rakenteen lämpötekniistä käyttäytymistä vertaamalla tuulettun ja tuulettamattoman rakenteen läpi tapahtuvaa lämpöhäviötä lämmityskaudella. EPS:llä lisäeristetyssä kevytsorakatossa tuuletus aiheuttaa 13 % lisän lämpöhäviöön (kuva 59).



Kuva 59. Lämpövuoto sisäilmasta rakenteeseen lämmityskaudella.

### 6.3 Maanvastainen alapohja

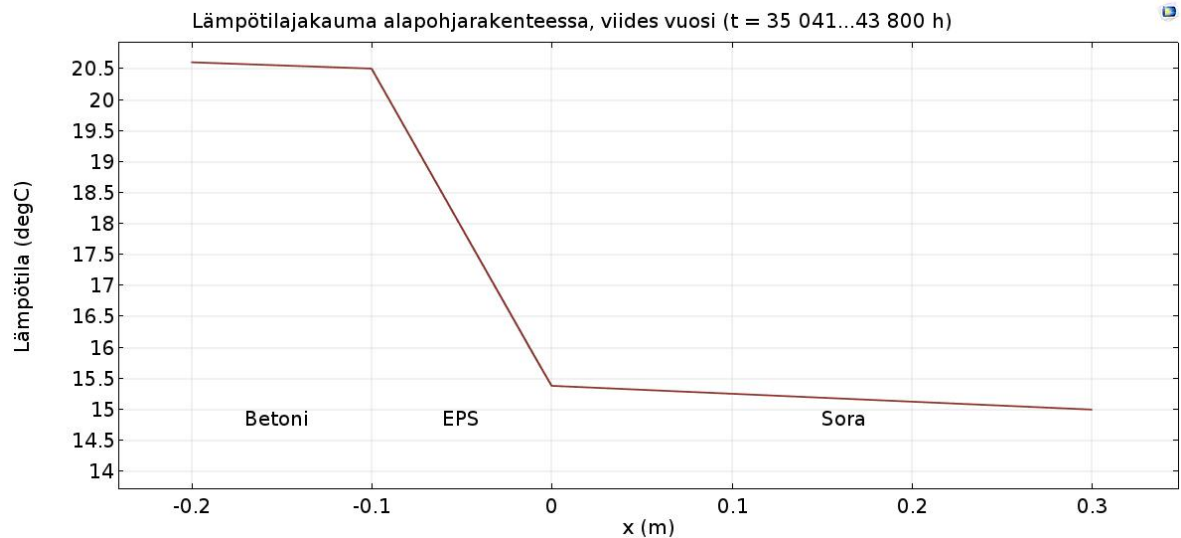
Laskennassa käytetty maanvastaisen alapohjan rakennetyyppi on esitetty kuvassa 60. Kuvassa on esitetty myös pinnat, joille lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot on annettu.



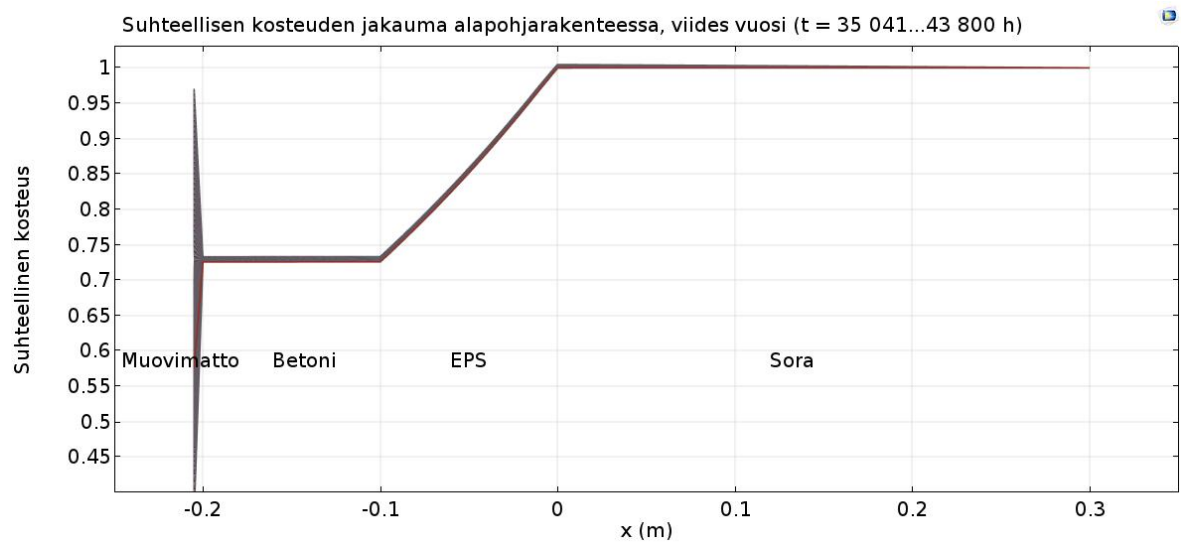
Kuva 60. Laskennassa käytetty maanvastaisen alapohjan rakennetyyppi ja rajapinnat, joissa tuloksia on tarkasteltu.

Maanvastaisen alapohjan laskennallisen tarkastelun tulokset osoittavat, että rakenteessa suurin lämmönvastus on EPS:llä ja suurin diffuusiovastus EPS:llä ja muovisella lattiapäällysteellä. Tämä nähdään lämpötilan ja suhteellisen kosteuden jakaumista rakenteessa (kuvat 61 ja 62). Kuvassa 61 suurin lämpötilamuutos tapahtuu eristekerroksen yli. Koska sekä sisäilman että sorakerroksen alapinnan lämpötilat ovat vakioita, lämpötilajakauma ei ole riippuvainen sääolosuhteista.





Kuva 61. Lämpötilajakauma alapohjarakenteessa viidennen vuoden kaikkina ajanhetkinä.



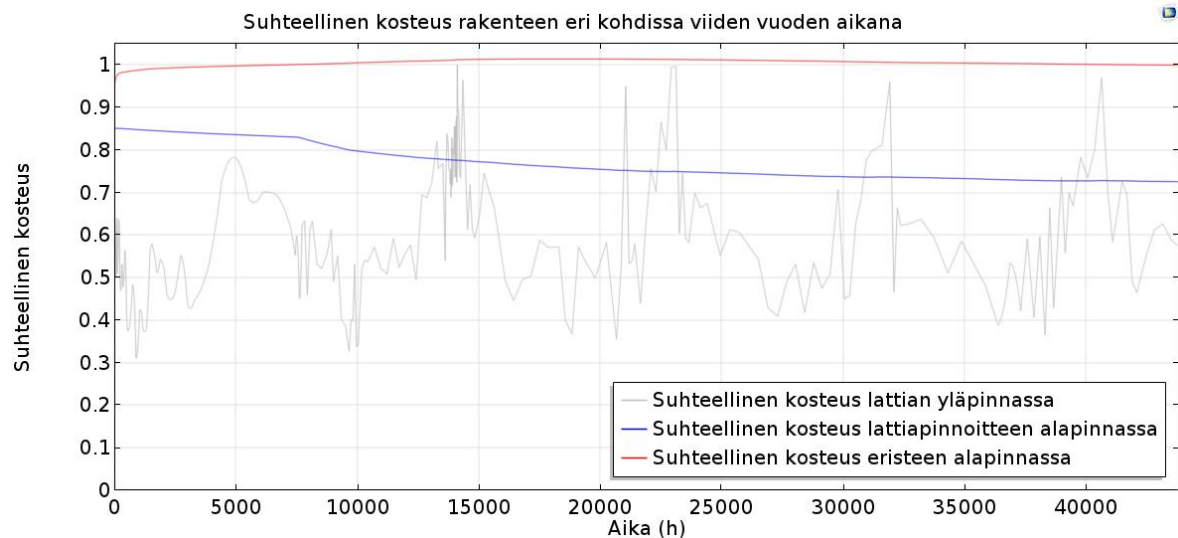
Kuva 62. Suhteellisen kosteuden jakauma alapohjarakenteessa viidennen vuoden kaikkina ajanhetkinä.

Kuvassa 62 on esitetty suhteellisen kosteuden jakauma alapohjarakenteessa viidennen vuoden kaikkina ajanhetkinä. Kuvaajasta nähdään, että vaikka sisäilman suhteellinen kosteus vaihtelee eri vuodenaikoina, säilyy suhteellisen kosteuden jakauma rakenteessa muuttumattomana. Betonin suhteellinen kosteus on 73 % ja soran 100 %. Suurimmat muutokset suhteellisessa kosteudessa tapahtuvat muovisen lattiamaton ja EPS:n yli, joista molemmilla on korkea diffuusiovastuskerroin.

Kuvassa 63 nähdään materiaalien rajapinnoissa olevien tarkastelupisteiden suhteellisen kosteuden vaihtelu viiden vuoden laskentajakson aikana. Kuvaajan perusteella voidaan sanoa, että sorakerroksen suhteellinen kosteus on jatkuvasti 100 %. Näin ollen mikrobikasvua lämmöneristeen alapinnassa ei voida estää, sillä lämpötila 15 °C, suhteellinen kosteus 100 % ja ravinteiden saatavuus tarjoavat erinomaiset olosuhteet mikrobikasvulle.

Suhteellinen kosteus muovisen lattiapäällysteen laskee arvosta 85 % arvoon 80 % ensimmäisten 10 000 tunnin kohdalla eli noin 14 kuukauden kohdalla. Viidennen vuoden

lopussa suhteellinen kosteus kyseisessä pisteessä on saavuttanut arvon 72 %. Tulosten perusteella voidaan sanoa muovisen lattiapäällysteen alapuolisen betonin kuivuvan erittäin hitaasti.



Kuva 63. Suhteellinen kosteus alapohjarakenteen kolmessa rajapinnassa viiden vuoden aikana.

## 6.4 Luotettavuusanalyysi

Käytettäessä tutkimusmenetelmänä laskentaa ovat tutkimustulosten luotettavuuteen vaikuttavat oleelliset asiat:

- yksinkertaistukset ja fysikaalisten ilmiöiden puuttuminen
- lähtötietojen laatu
- mallinnukseen liittyvät virheet
- numeeriseen ratkaisuun liittyvät virheet ja
- tulosten analysointiin liittyvät virheet.

Rakenteissa tapahtuva lämmön- ja kosteudensiirto on luonteeltaan monimutkainen aihepiiri, johon liittyy paljon erilaisia fysikaalisia ilmiöitä. Käytettyihin osittaisdifferentiaaliyhtälöihin liittyviä oletuksia on käsitelty luvussa 3.4.2. Yhtälöistä puuttuvia fysikaalisia ilmiöitä ovat muun muassa:

- Rakenteiden sisäiset ilmavirrat. Konvektion osuus lämmön- ja kosteudensiirrossa huomioidaan vain tuuletusvälissä ja rakenteiden pinnalla. Rakenteiden oletetaan olevan ilmatiiviitä.
- Kosteuden tiivistyminen pinnoille. Yhtälöissä kosteus on aina sitoutuneena materiaaleihin tai ilmaan eikä vapaata vettä esiinny.
- Painovoimainen kosteudensiirto. Edellisen kohdan pohjalta seuraa, että kosteus ei siirry rakenteissa painovoimaisesti, vaan ainoastaan diffuusion, kapillaari-imun ja konvektion vaikutuksesta.
- Säteilylämmönsiirto materiaaleissa. Säteilyn osuus ei sisälly lämmönsiirron osittaisdifferentiaaliyhtälöön. Ulkopinnoilla auringon säteily huomioitiin kevytsorakaton laskentamallissa mutta ei ulkoseinän laskentamallissa. Taivaan vastasäteilyä ei huomioitu, koska sen laskemiseen tarvittavia lähtötietoja ei ollut saatavilla.
- Veden kiinteä olomuoto eli lumi ja jää.

Lisäksi kevytsorakaton laskentamallissa tehtiin huomattava yksinkertaistus asettamalla tuuletusilma virtaamaan 50 mm paksussa tuuletusvälissä sen sijaan että ilma virtaisi koko kevytsorakerroksessa. Tulosten luotettavuutta voitaisiin parantaa suorittamalla laskenta menetelmällä, joka ottaa huomioon kevytsorassa tapahtuvan ilmavirtauksen koko eristekerroksessa. Virtausnopeus voidaan ratkaista Darcyn lain avulla (liite 5), minkä jälkeen lämpötila ja suhteellinen kosteus voidaan ratkaista kaavojen (36) ja (37) avulla.

Laskenta ei ota huomioon asennustyön laatuongelmia, jotka voivat aiheuttaa rakenteeseen ilmavuotokohtia tai sadeveden tunkeutumista rakenteeseen suuremmissa määrin kuin ASHRAE-standardin edellyttämä 1 %:n osuus viistosateesta. Todellisissa rakenteissa rakenteen epätiiviiin kohdan läpi ulos virtaava sisäilma voi aiheuttaa kosteuden tiivistymistä rakenteen viileisiin osiin. Lisäksi jos vedenerityskerroksen toteutuksessa on laatuongelmia, voi rakenteeseen vuotaa vettä sen läpi.

Laskennan ulkopuolelle jäävistä ilmiöistä kosteuden tiivistyminen pinnoille ja painovoimainen kosteudensiirto voivat heikentää betonisandwich-ulkoseinän ja kevytsorakaton kosteusteknistä toimintaa. Tulosten perusteella betonisandwich-ulkoseinässä mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnan suhteellinen kosteus saavuttaa kondenssirajan. Jos kosteutta tiivistyy betonin pinnalle, se voi valua rakenteen alaosaan, minkä seurauksena sinne kertyy kosteutta.

Kevytsorakaton kaikkien tutkittujen rakennetyyppien suhteellinen kosteus on tulosten mukaan niin matala, ettei pinnalle tiivistymistä tapahdu. Todellisessa rakenteessa tuuletusilma virtaa kuitenkin koko kevytsorakerroksen paksuudella, ja on mahdollista, että tuuletusilman kosteus tiivistyy katelaatan alapintaan tuloaukon läheisyydessä, jos ulkoilman absoluuttinen kosteus on korkea. Tällöin on myös mahdollista, että tiivistynyt kosteus siirtyy painovoiman vaikutuksesta höyrynsulun päälle. Jos eristeenä käytetään EPS:ää, on höyrynsulun päälle kertyneen kosteuden kuivuminen hidasta (Vahanen 2012b).

Laskennan lähtötiedoista erityisesti materiaaliominaisuuksiin liittyy epävarmuutta. Lähteiden luotettavuuteen pyrittiin kiinnittämään erityistä huomiota. Joidenkin materiaalien kohdalla jouduttiin kuitenkin yhdistämään eri lähteistä peräisin olevia ominaisuuksia (liite 1). Materiaalien ominaisuuksien odotettiin säilyvän muuttumattomina eikä ikääntymisen vaikutusta huomioitu. Tulosten luotettavuutta voitaisiin parantaa suorittamalla herkkyystarkastelu, jonka avulla saadaan tietoa eri lähtöarvojen vaikutuksesta laskennan tulokseen. Herkkyystarkastelu tehtiin työssä vain maanvastaisen alapohjan laskentamallille.

Myös säädataan ja sisäilman olosuhteisiin liittyviin oletuksiin liittyy epävarmuutta. Erityisesti sisäilman pitäminen vakiolämpötilassa 21 °C ei välttämättä vastaa todellista tilannetta rakennuksissa kesäisin. Rakenteet toimivat talviolosuhteisiin nähden käänteisellä tavalla, jos sisäilmaa jäähdytetään kesäisin ulkoilman lämpötilaa matalampaan lämpötilaan.

Tuuletettujen rakenteiden tapauksessa ilman virtausnopeuden määrittämisessä käytettiin suoraan kirjallisuudesta saatua nopeuden arvoa tai kirjallisuudesta löytyneitä lähtötietoja nopeuden määrittämiseksi. Tutkimustulosten luotettavuutta olisi voitu parantaa tutkimalla rakenteita useilla eri virtausnopeuksilla. Pitkien laskenta-aikojen vuoksi tähän ei kuitenkaan ollut mahdollisuutta.

Mallinnuksessa käytettiin pääosin COMSOL Multiphysics -ohjelmaa. Ohjelman haittapuolena on, että se sisältää hyvin vähän rakennusfysiikan laskentaan soveltuvia sisäänrakennettuja komponentteja. Tässä työssä käytetyistä lähtötiedoista säädätä, sisäilman kosteus, viistosade ja auringon säteily sekä materiaaliominaisuudet tuotiin ohjelmaan txt-tiedostoina. Osa lähtötiedoista määritettiin käsinlaskentana ja COMSOL Multiphysics -ohjelmassa käytettiin useita itse luotuja analyttisiä funktioita. Näin ollen laskujen virheettömyys on suurelta osin käyttäjän vastuulla. Laskentaohjelmien käyttö edellyttää luonnollisesti aina osaamista käyttäjältä, mutta käytettäessä rakennusfysiikan laskentaa varten kehitettyä työkalua (esimerkiksi WUFI®) ja siihen sisäänrakennettuja ominaisuuksia, on käyttäjän tekemän laskuvirheen mahdollisuus pienempi.

Epäselvyyttä aiheutti erityisesti kysymys, tuleeko tiettyjen lähtötietojen määrittäminen tehdä tunneittain muuttuvan säädätan perusteella vai erilaisia keskiarvoja käyttäen. WUFI®-ohjelmassa sisäilman suhteellisen kosteuden laskenta tehdään käyttäen kuukauden ajanjaksolle laskettua liukuvaa keskiarvoa ulkoilman lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle (WUFI-2D 2007, topic 63). Laskentatavan etuna on, että se poistaa datasta piikkiarvot ja johtaa sisäilman suhteellisen kosteuden vaihteluun arvojen 38 – 80 % välillä. Sen sijaan käytettäessä tunneittain muuttuvia arvoja ulkoilman olosuhteille vaihteli sisäilman suhteellinen kosteus välillä 27 – 100 % (liite 2).

Sama kysymys aiheutti eroavaisuutta viistosateen käsittelyyn COMSOL Multiphysics ja WUFI® 2D -ohjelmissa. WUFI® 2D -ohjelma laskee viistosateen käyttäen tuulen nopeudelle ja suunnalle koko vuoden keskiarvoa (WUFI-2D 2007, topic 62). COMSOL Multiphysics -ohjelmaan viistosade laskettiin tunneittain muuttuvalle säädätalle (liite 3).

Käytettäessä numeerisia menetelmiä työkaluna, sisältyy tuloksiin aina epätarkkuutta. Virhe voi olla merkittävä, jos laskentaverkko on liian harva. Parhaimmillaan käyttäjän tulisi ajaa simulaatio usealla eri laskentaverkolla ja verrata tuloksia. Varsinaiseen laskentaan käytettäisiin harvinta mahdollista verkkoa, joka tuottaa saman tuloksen kuin tihein käytetty verkko. Samalla tavoin voitaisiin tutkia toleranssin arvon vaikutusta tuloksiin. Kyseistä vertailua ei tässä työssä suoritettu järjestelmällisesti.

Edellä mainittujen virhelähteiden lisäksi myös tulosten analysoinnissa voidaan tehdä laskuvirheitä tai vääriä tulkintoja. Tässä työssä saadut tulokset pätevät vain laskennassa tutkituille rakennetyypeille eikä tuloksia voi yleistää koskemaan muita rakennetyyppejä. Jo yhden materiaalin muuttaminen toiseksi voi muuttaa rakenteen toimintaa merkittävästi. Samoin tulee muistaa, että lähtötietona käytettiin Vantaan rakennusfysiikan testivuotta 2030, eivätkö tulokset siten päde siirryttäessä tästä poikkeavaan ilmastoon.

## 7 Johtopäätökset

### 7.1 Rakentamismääräysten muutos 1.1.2018

Vuoden 2018 alussa voimaan astuva Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta (A 1010/2017) sisältää huomattavia muutoksia E-luvun raja-arvoihin. Muutoksen vaikutusta rakennusalaan pienentää kuitenkin toinen samana ajankohtana voimaan astuva Ympäristöministeriön asetus (A 788/2017), jolla pienennetään E-luvun laskennassa käytettäviä sähkön, kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen energiamuotojen kertoimia noin 30 %. Asetusten yhteisvaikutuksen jälkeen toimistorakennukselta vaaditaan noin 20 %:n vähennystä ostoenergian kulutukseen.

Rakenteiden U-arvojen vertailuarvoihin ei tullut asetuksen myötä muutosta. Poikkeuksena ovat asuinrakennukset, joiden energiatehokkuus voidaan osoittaa joko E-luvun tai vaihtoehtoisesti rakenteellisen energiatehokkuuden avulla. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa edellytetään matalaenergiatasoisten rakenteiden käyttöä.

Koska edellä mainittua poikkeusta lukuun ottamatta U-arvojen vertailuarvot pysyvät muuttumattomina, ei rakenteiden kosteustekniseen toimintaan tule tältä osin muutosta. Koneellisen ilmanvaihdon yleistymisellä puolestaan on positiivinen vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimintaan, koska kontrolloitu ilmanvaihto auttaa hallitsemaan sisäilman suhteellista kosteutta, jolloin rakenteisiin kohdistuva kosteusrasitus on pienempi.

### 7.2 Tutkittujen rakenteiden kosteustekninen toimivuus

#### 7.2.1 Betonisandwich-ulkoseinä

Betonisandwich-ulkoseinän tuloksista käy ilmi, että mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnan suhteellinen kosteus saa arvoja välillä 90 – 100 % lukuun ottamatta lyhyttä kuivempaa kautta keskikesällä. Rajapinta saavuttaa talvisin kondenssirajan. Korkea suhteellinen kosteus voi aiheuttaa ongelmia muun muassa materiaalien säilymisessä. Esimerkiksi pakkasrapautuminen voi vaurioittaa betonia. Rakenteessa olevat materiaalit eivät tarjoa ravinteita mikrobikasvulle, joten korkea suhteellinen kosteus ei välttämättä johda homevaurioon. Asian tarkempaa selvittämistä varten tuloksia tulisi jälkikäsitellä VTT:n ja TTY:n kehittämän homemallin avulla.

Verrattaessa uratuuletettua ja tuulettamatonta rakennetta havaittiin, että tuuletus edistää rakenteen kuivumista kesäkaudella. Tuulettamattomassa rakenteessa mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnan suhteellinen kosteus ei laskenut edes kesäisin alle 90 %:n. Talviolosuhteissa suhteellinen kosteus kyseisessä rajapinnassa on molemmissa rakenteissa lähellä kondenssirajaa.

Viistosade kuormittaa betoniulkokuorta huomattavissa määrin. Laskentamallissa käytetty maalaamaton betonipinta imee sadevettä kapillaarisesti, jolloin koko betoniulkokuori kastuu sateen vaikutuksesta. Julkisivuun kohdistuvaa viistosaderasitusta voidaan pienentää maalaamalla betonin ulkopinta tai käyttämällä muuta suojaavaa julkisivuratkaisua, kuten kasettijulkisivua. Kyseiset ratkaisut eivät kuitenkaan kokonaan poista viistosaderasitusta.

Suhteellinen kosteus mineraalivillan ja betoniulkokuoren rajapinnassa on tulosten mukaan keväällä ja kesällä matalampi tuuletusuran vieressä kuin tuuletusurien puolivälissä. Talviolosuhteissa marraskuusta helmikuuhun suhteellinen kosteus saa kuitenkin arvoja 97 – 100 % molemmissa pisteissä. Tästä voidaan päätellä, ettei tuuletuksen toteuttaminen koko seinän levyisessä tuuletusvälissä välttämättä pidä rakennetta talviolosuhteissa kuivempana kuin tuuletusurilla tuulettaminen. Betoniulkokuoren olosuhteet ovat käytännössä hyvin lähellä ulkoilman olosuhteita. Tulos on yhtäpitävä Salonvaaraan ja Niemisen (2003, s. 53) tutkimuksen kanssa, jonka perusteella tuuletustavalla (yhtenäinen tuuletusväli tai tuuletusurat) ei ole vaikutusta kosteustasoon.

Betonisandwich-ulkoseinän tapauksessa perehdyttiin myös kysymykseen, miten eristepaksuus vaikuttaa rakenteen kuivumiskapasiteettiin (liite 6). Käsineläskuesimerkin tulosten perusteella voidaan sanoa, ettei eristepaksuus oleellisesti vaikuta tuuletukseen kykyyn sitoa kosteutta rakenteesta. Tuuletusuran lämpötila on hyvin lähellä ulkoilman lämpötilaa riippumatta siitä, käytetäänkö rakentamismääräysten mukaista vai tätä paksumpaa lämmöneristettä. Näin ollen tuuletusilman kyky sitoa rakenteesta kosteutta ei oleellisesti muutu, vaikka eristepaksuutta kasvatettaisiin. Esimerkkilaskun lähtötiedoilla kuivumiskapasiteetti heikkeni 5 °C:n lämpötilassa 4,3 % ja 15 °C:n lämpötilassa 1,6 %, kun eristepaksuutta kasvatettiin 150 millimetristä 250 millimetriin.

## 7.2.2 Kevytsorakatto

Laskennan tulosten perusteella kevytsorakaton alkukosteus kuivuu pääosin ensimmäisen vuoden aikana, ja käyttötilassa rakenteen suhteellinen kosteus on alle 80 %. Tulos pätee kaikille tutkituille rakennetyypeille eli pelkällä kevytsoralla eristetyille rakenteille ja mineraalivillalla ja EPS:llä lisäeristetyille rakenteille. Tuuletus poistaa kosteutta rakenteesta aina vuoden ensimmäisellä puoliskolla. Vuoden toisella puoliskolla tuuletus tuo kattoon kosteutta.

Tuuletus poistaa kosteutta kevytsorakatosta tehokkaasti, koska tuuletus ulottuu koko kevytsorakerrokseen. Tuuletusilma pystyy sitomaan sitä enemmän kosteutta, mitä enemmän se lämpenee kevytsorassa virratessaan ja mitä matalampi ulkoilman absoluuttinen kosteus on. Näin ollen tuuletuksen kuivattava vaikutus on kevytsorakatossa suurempi kuin rakenteissa, joissa tuuletus tapahtuu rakenteen viileässä osassa.

Toisaalta rakenteen heikkoutena on, että tuuletusilman lämmittämiseen tarvitaan energiaa, mikä kasvattaa lämpövuota sisäilmasta yläpohjaan. Tuulenpuoleisen räystään alue jäähtyy talviolosuhteissa, kun kylmä tuuletusilma virtaa kattoon. Työssä verrattiin rakenteen läpi tapahtuvaa lämpöhäviötä lämmityskauden aikana tuuletetuissa ja tuulettamattomissa rakenteissa. Pelkällä kevytsoralla eristetyssä kevytsorakatossa tuuletus aiheutti 47 %:n lisän lämpöhäviöön. Mineraalivillalla lisäeristetyssä kevytsorakatossa lisä oli 12 % ja EPS:llä lisäeristetyssä kevytsorakatossa 13 %. Näin ollen tuuletus heikentää rakenteen energia- tehokkuutta merkittävästi erityisesti pelkällä kevytsoralla eristetyssä rakenteessa. Myös lisäeristetyissä rakenteissa tuuletuksen aiheuttama lisä tulisi ottaa huomioon eristepaksuuden valinnassa.

Verrattaessa kevytsorakaton vaihtoehtoisia rakennetyyppejä tunnistettiin mineraalivillalla ja EPS:llä lisäeristettyjen kevytsorakattojen välillä vain hyvin vähäisiä eroavaisuuksia. Sekä mineraalivillan että EPS:n lämmönjohtavuudelle käytettiin työssä arvoa 0,04 W/(m K), jolloin rakenteiden lämpötilajakaumat muodostuivat identtisiksi. Erona materiaalien välillä

on diffuusiovastuskertoimessa, sillä EPS:n diffuusiovastuskerroin on työssä käytetyillä materiaaliominaisuuksilla 23-kertainen mineraalivillan diffuusiovastuskertoimeen verrattuna. Kyseinen ero ei kuitenkaan merkittävästi vaikuttanut kosteudensiirtoon rakenteessa, koska molemmissa rakenteissa käytettiin bitumista höyrynsulkua, minkä vuoksi eristemateriaalien erilaiset diffuusiovastuskertoimet eivät juuri aiheuttaneet eroavaisuutta tuloksiin. Kaikkien tutkittujen rakennetyyppien, mukaan lukien pelkällä kevytsoralla eristetty katto, kosteuspitoisuus oli käyttötilassa luokkaa 13 – 14 g/m<sup>3</sup>, joten merkittäviä eroavaisuuksia ei tältä osin havaittu.

Eroavaisuuksia sisältyy sen sijana eri rakennetyyppien lämpötekniiseen toimintaan. Edellä mainittu tuuletuksen aiheuttama lisä lämpövuohon on merkittävin pelkällä kevytsoralla eristetyssä katossa. Pelkällä kevytsoralla eristetyssä katossa kevytsoran alapinnan lämpötila on talvellakin lähellä sisäilman lämpötilaa ja saa matalimmillaan arvon 18,0 °C. Mineraalivillalla lisäeristetyssä katossa vastaava lämpötila on matalimmillaan 5,0 °C ja EPS:llä lisäeristetyssä katossa 3,5 °C. Näin ollen tuuletuksilman lämmittämiseen tarvitaan pelkällä kevytsoralla eristetyssä katossa enemmän energiaa kuin lisäeristetyissä rakenteissa. Tuloksista voidaan päätellä, että lisäeristämällä on positiivinen vaikutus kevytsorakaton energiatehokkuuteen.

Kevytsorakaton kosteusteknistä toimintaa edistävät siinä olevat bitumiset kosteuseristeet. Kantavan laatan päällä oleva höyrynsulku vähentää sisäilmasta peräisin olevaa kosteusrasitusta. Rakenteen uloin kerros eli bitumikermi estää sadeveden pääsyn rakenteeseen ja vähentää ulkoilman kosteuden siirtymistä rakenteeseen diffuusiolla. Vedeneristeiden vesitiiviys on rakenteen toiminnan ehdoton edellytys. Läpivientien toteutus tulee suorittaa erittäin huolellisesti ja kermikatteen kuntoa tulee tarkkailla rakennuksen käyttöänsä aikana. Myös kattokaivojen toiminta tulee varmistaa pitämällä ne puhtaana lehdistä ja muusta roskasta.

Työssä ei tutkittu kevytsorakaton käyttäytymistä vikatilanteessa, jossa kattoon vuotaa sadetta. Syynä tähän oli, ettei vuodon määrää voida arvioida, jolloin laskennan tulosten yleistettävyyden on heikko. Vahanen Oy:n toimeksiannossa (Vahanen 2012b) arvioitiin vuotojen vaikutusta katon toimintaan. Saatujen tulosten perusteella EPS:llä lisäeristetyn kevytsorakaton heikkoudeksi luettiin, että höyrynsulkukerroksen päälle valunut sadevesivuodosta peräisin oleva kosteus kuivuu EPS:n läpi erittäin hitaasti. Mineraalivillan matalamman diffuusiovastuskertoimen ansiosta kosteus kuivuu mineraalivillalla lisäeristetyssä kevytsorakassa vastaavassa tilanteessa nopeammin.

### 7.2.3 Maanvastainen alapohja

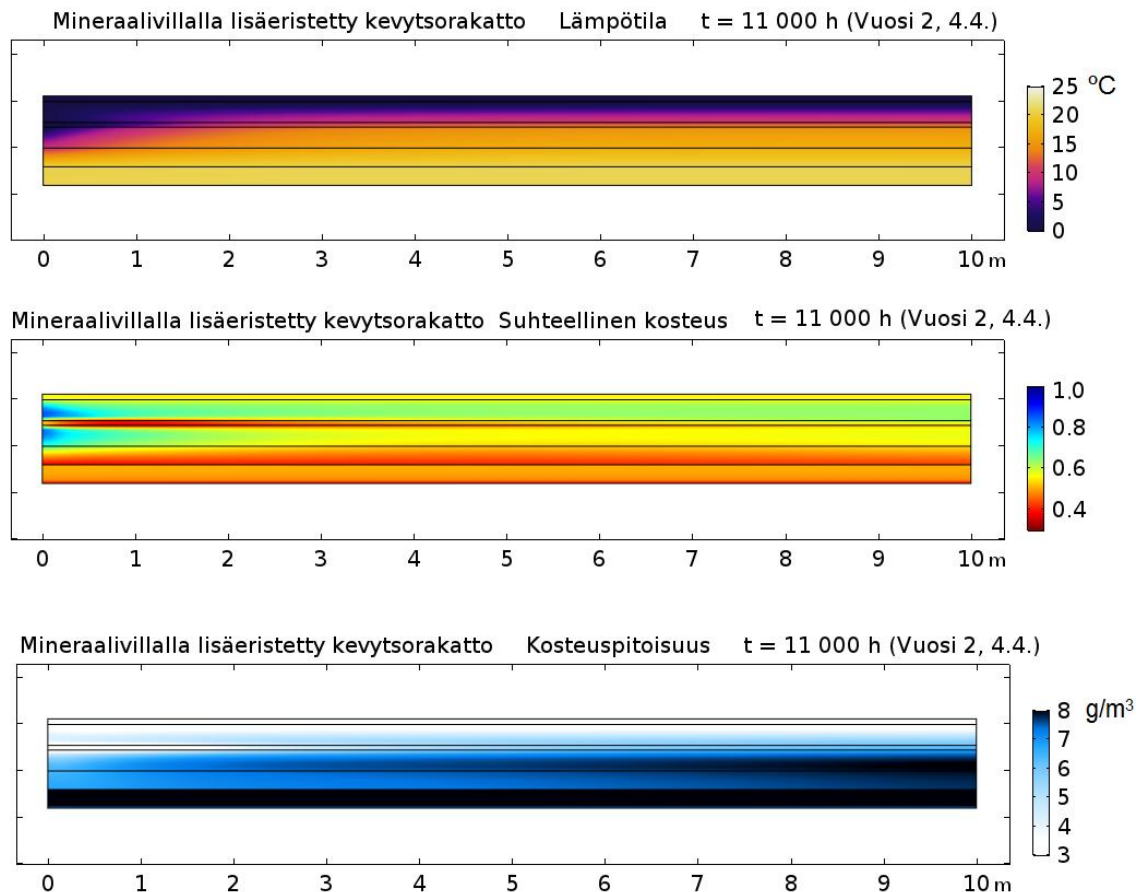
Maanvastaisessa alapohjassa sorakerroksen ja lämmöneristeen alapinnan suhteellinen kosteus on 100 % ja lämpötila noin 15 °C kaikkina vuodenaikoina. Koska lisäksi maanpohja sisältää runsaasti orgaanista materiaalia, ei mikrobikasvua näissä osissa rakennetta voida estää. Rakenteen toiminnan edellytys on sen ilmatiiviys, sillä sorakerroksessa oleva ilma sisältää epäpuhtauksia eikä se saa olla yhteydessä sisäilmaan.

Muovisen lattiapäällysteen asentamisen jälkeen betonilaatan kuivuminen on erittäin hidasta. Tämä laskennan tulos on yhtäpitävä kirjallisuudesta löytyvän tiedon kanssa. Rakenteen toteutuksessa on varmistettava, että betoni on kuivunut suhteelliseen kosteuteen 85 % ennen lattiapäällysteen asentamista.

### 7.3 Johtopäätöksiä tuuletetuista rakenteista

Rakenteiden tuuletus on aihepiiri, joka sisältää useita fysikaalisia ilmiöitä ja jonka analysoimisesta jatkuvasti muuttuvat sääolosuhteet tekevät haastavaa. Ensinnäkin tuuliolosuhteet vaikuttavat ilmavirtaukseen rakenteessa. Tähän ilmiöön ei perehdytty tämän työn puitteissa, vaan ilmiötä yksinkertaistettiin käyttämällä tuuletusilmalle tuloaukossa vakionopeutta. Todellisuudessa esimerkiksi kevytsorakatossa tuuletusilman virtausnopeus ja myös suunta muuttuvat tuulen aiheuttamien paine-erojen seurauksena. Betonisandwich-ulkoseinässä tuuletusilman virtausnopeus on yhdistelmä savupiippuvaikutusta ja tuulen aiheuttamien paine-erojen aikaansaamaa virtausta.

Tuuletuksen vaikutus rakenteen lämpötekniiseen toimintaan riippuu ennen kaikkea ulkoilman lämpötilasta. Talviolosuhteissa tuuletusvälin- tai uran tuloaukon alue viilenee (kuva 64). Tuuletusilman lämpeneminen ulkoilman lämpötilasta rakenteen lämpötilaan kasvattaa sisäilmasta rakenteeseen suuntautuvaa lämpövuota tuloaukon puoleisessa osassa rakennetta. Lisäksi myös kosteuden sitoutuminen ja vapautuminen vaikuttavat rakenteen lämpötekniiseen käyttäytymiseen, sillä höyrystymisen yhteydessä sitoutuu ja tiivistymisen yhteydessä vapautuu latenttia lämpöä.



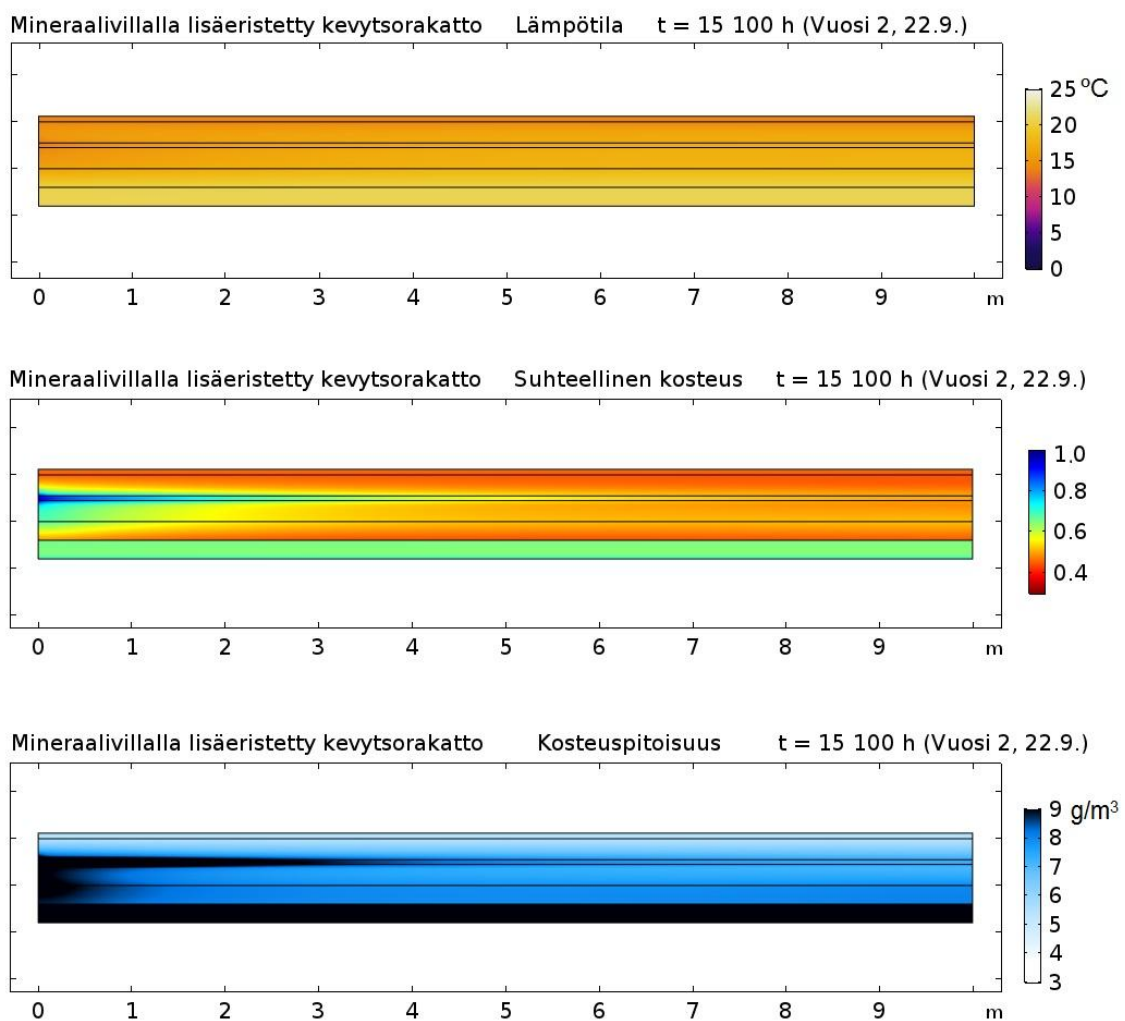
Kuva 64. Mineraalivillalla lisäeristetty kevytsorakatto toisen laskentavuoden keväällä ajanhetkellä  $t = 11\,000\text{ h}$ .

Tuuletusilma hakeutuu kaikissa tilanteissa kohti tasapainotilaa tuuletusväliä tai -uraa ympäröivien rakennekerrosten kanssa. Tuuletusilma saavuttaa rakenteessa virratessaan kyllästystilan ainoastaan siinä tapauksessa, että myös rakenteen suhteellinen kosteus on 100



%. Tasapainotilan periaate pätee sekä lämpötilalle että suhteelliselle kosteudelle. Tuuletuksen sisällyttäminen kaksikulotteisiin laskentamalleihin lähdetermeinä (kaavat (45) ja (46)) perustuu tasapainotilan periaatteeseen ja kuvaa rakennetta poistoaukon puoleisessa päädyssä.

Tuuletus voi joko poistaa kosteutta rakenteesta tai tuoda sitä rakenteeseen. Kosteusvirran suunta riippuu sekä ulkoilman olosuhteista että rakenteen lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Jos tuuletusilman suhteellinen kosteus sen lämmitettyä rakenteen lämpötilaan on matalampi kuin rakenteen suhteellinen kosteus, se sitoo kosteutta itseensä ja poistaa kosteutta rakenteesta (kuva 64). Jos taas rakenne on jo kuiva, syntyy tilanne, jossa rakenteen suhteellinen kosteus on matalampi kuin tuuletusilman suhteellinen kosteus sen saavutettua rakenteen lämpötila (kuva 65). Tässä tapauksessa kosteusvirran suunta on tuuletusilmasta rakenteeseen.



*Kuva 65. Mineraalivillalla lisäeristetty kevytsorakatto toisen laskentavuoden syksyllä ajanhetkellä  $t = 15\,100\text{ h}$ . Kosteuspitoisuuden asteikkoa on muokattu kuvaan 64 nähden visuaalisista syistä.*

Tasapainotilan muodostumista tuuletusilman ja rakenteen välille mineraalivillalla lisäeristetyssä kevytsorakatossa on havainnollistettu kuvissa 64 ja 65. Kuva 64 havainnollistaa kevään olosuhteita, joissa tuuletus poistaa kosteutta rakenteesta. Ensimmäisten metrien

matkalla tuuletusilma lämpenee, jolloin sen suhteellinen kosteus laskee. Tämän jälkeen tuuletusilma sitoo kosteutta rakenteesta. Kosteuspitoisuuden kuvaajasta nähdään, että rakenne on kuivunut tuloaukon puoleisesta osasta rakennetta, mutta poistoaukon puoleisessa osassa rakennetta on havaittavissa korkeamman kosteuspitoisuuden alue. Tuuletusilman suhteellinen kosteus poistoaukossa on kuvan ajanhetkellä 57 %. Sen absoluuttinen kosteuspitoisuus nousee tuloaukon arvosta  $2,1 \text{ g/m}^3$  poistoaukon arvoon  $6,4 \text{ g/m}^3$ .

Kuva 65 puolestaan havainnollistaa tilannetta syksyllä, jolloin tuuletus tuo kosteutta rakenteeseen. Kosteuspitoisuuden kuvaajasta havaitaan, että tuuletusilman absoluuttinen kosteus on korkeampi kuin rakenteen absoluuttinen kosteus. Ilman absoluuttinen kosteus laskee sen virratessa rakenteessa, eli ilma luovuttaa kosteutta rakenteeseen. Sen absoluuttinen kosteus laskee tuloaukon arvosta  $10,9 \text{ g/m}^3$  poistoaukon arvoon  $7,3 \text{ g/m}^3$  ja sen suhteellinen kosteus laskee arvosta 92 % arvoon 50 %.

#### **7.4 Käytetyn laskentamenetelmän soveltuvuus rakennusfysiikan laskentaan**

Työn laskentaosuus toteutettiin pääosin COMSOL Multiphysics -ohjelman fysiikkamoduuleilla Heat Transfer in Building Materials ja Moisture Transport in Building Materials sekä ne kytkevällä multifysiikkamoduulilla Heat and Moisture. Kyseiset moduulit ovat ohjelman version 5.3 uusia ominaisuuksia. Versio 5.3 julkaistiin 25.4.2017 eli vain kuukautta ennen tämän työn aloittamista. COMSOL Multiphysics -ohjelman kirjastosta (Application Gallery) on saatavilla eurooppalaisen standardin (SFS-EN 15026 2007) mukaiset validointitapaukset 1 – 4 laskentamenetelmälle.

Johtuen käytettyjen fysiikkamoduulien tuoreudesta, aiempaa käyttökokemusta moduuleista ei ollut. Kirjallisuuskatsauksen perusteella aiemmissa COMSOL Multiphysics -ohjelmaa käyttäneissä tutkimuksissa (mm. Schijndel 2011; Williams Portal et al. 2011) on sovellettu Partial Differential Equations -fysiikkamoduulia, jossa käyttäjä voi itse määritellä osittais-differentiaaliyhtälöitä. Muita alalla käytettyjä työkaluja ovat muun muassa WUFI® ja DELPHIN.

COMSOL Multiphysics -ohjelma tarjoaa kaksi merkittävää etua. Ensinnäkin se mahdollistaa kolmannen tilalautuvuuden sisällyttämisen laskentamalliin. Rakennusfysiikassa tämä mahdollistaa esimerkiksi erilaisten kylmäsiltautapausten tutkimisen. Toinen huomattava etu on, että lämmön- ja kosteudensiirtoon voidaan yhdistää muita fysiikkailmiöitä, kuten ilma-virtausta tai mekaniikan suureita.

Työn myötä saatujen ensimmäisten käyttökokemusten perusteella merkittävimmät laskentaan liittyvät ongelmat olivat mallien pitkät laskenta-ajat ja konvergenssiongelmat. Edes Tieteen tietotekniikan keskus CSC:ltä saadut laskentaresurssit eivät olennaisesti helpottaneet tilannetta, koska ongelman ydin oli joidenkin mallien heikko konvergenssi. Useiden erilaisten laskentaverkkojen käytöstä huolimatta ongelmaa ei saatu ratkaistua. Tästä syystä ulkoseinän kolmiulotteisen laskentamallin tarkastelujaksoa jouduttiin lyhentämään kolmeen kuukauteen ja täydentämään laskentaa kaksiulotteisella laskennalla WUFI® 2D-ohjelmalla.

Pitkät laskenta-ajat tuovat mukanaan käytännön ongelmia, jotka hankaloittavat työskentelyä: Laskennassa on vähemmän mahdollisuuksia toteuttaa yrittä ja erehdy -tyyppistä oppimista. Laskentamallien virheiden löytämiseen ja korjaamiseen kuluu paljon

aikaa. Lisäksi pitkä laskenta-aika ajaa käyttämään harvempaa laskentaverkkoa, jolloin tulosten tarkkuus kärsii.

Lisäksi Heat Transfer in Building Materials ja Moisture Transport in Building Materials -moduulien käytössä tulee huomioida, etteivät moduulit sisällä yhtä paljon sisäänrakennettuja ominaisuuksia kuin esimerkiksi WUFI®-ohjelma. Esimerkiksi sisäilman suhteellinen kosteus jouduttiin laskemaan käsinlaskentana, kun taas WUFI®-ohjelmassa voidaan syöttää suoraan sisäilman kosteuslisän interpolaatiofunktio. COMSOL Multiphysics -ohjelman käyttö vaatii tästä syystä enemmän kokemusta, tarkkuutta ja aikaa käyttäjältä.

## 7.5 Työn merkitys

Työn kahdesta pää tavoitteesta ensimmäinen oli hankkia lisätietoa kysymykseen, ovatko tapaustutkimuksen esimerkkirakennuksena toimineen toimistorakennuksen rakenteet kosteusteknisesti toimivia. Hyvin eristettyjen rakenteiden kosteustekninen toiminta on aihepiiri, joka on herättänyt alalla paljon keskustelua viime vuosina. Tampereen teknillisen yliopiston esittämä kritiikki on osaltaan vaikuttanut siihen, että paksujen lämmöneristeiden käyttöä pidetään kosteusteknisen toimivuuden kannalta kyseenalaisena. Lisäksi termi ”lähes nollaenergiatalo” on synnyttänyt käsityksen, että eristepaksuutta oltaisiin 1.1.2018 voimaan astuvissa rakentamismääräyksissä edelleen kasvattamassa.

Työn luku 2 ”Vaatimuksena lähes nollaenergiarakennus” selventää Ympäristöministeriön asetusta uuden rakennuksen energiatehokkuudesta ja osoittaa, että käsitys matalampiin U-arvoihin siirtymisestä ei toimistorakennuksen kohdalla pidä paikkansa. Työn luku 4 ”Kirjallisuuskatsaus valikoitujen rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta” puolestaan selkeyttää eristepaksuuden ja kosteusteknisen toimivuuden yhteydestä käytyä tähänastista keskustelua.

Työn laskentaosuus tarjoaa tietoa käsiteltyjen rakenteiden eli betonisandwich-ulkoseinän, kevytsorakaton ja maanvastaisen alapohjan kosteusteknisestä toimivuudesta. Tuloksilla on käytännön merkitystä suunnittelijoille ja rakennuttajille. Kevytsorakaton kohdalla aikaisempaa julkaistua tutkimustietoa ei juuri löydy. Kirjallisuuskatsauksen perusteella kevytsorakatosta löytyy tietoa lähinnä materiaalivalmistajan omasta esitteestä, joka perustuu julkaisemattomiin toimeksiantoihin.

Työn tavoitteena oli tutkia esimerkkirakennuksen rakennetyyppien lisäksi myös liitosten ja läpivientien kosteusteknistä toimivuutta. Tästä osatavoitteesta jouduttiin luopumaan, koska pitkät laskenta-ajat ja konvergenssiongelmat vaikeuttivat laskennan suorittamista merkittävällä tavalla.

Työn toinen päätavoite oli saada kokemusta kolmiulotteisesta ajasta riippuvasta lämmön- ja kosteudensiirron laskennasta sekä tutkia tuuletusilmavirtauksen sisällyttämistä rakennusfysiikan laskentaan. Kyseisten laskentamenetelmien käyttöönotto lisäisi rakennusfysiikan laskennan tarkkuutta merkittävällä tavalla. Erilaiset läpiviennit, katolla olevat asennukset, kuten alipainetuulettimet tai kattopollarit, tai toisaalta rakennusten kulmat ovat esimerkkejä tilanteista, joissa kolmiulotteinen laskenta antaa luotettavampia tuloksia. Kolmiulotteisen tarkastelun avulla voidaan jatkossa myös tutkia tuuletuksen vaikutusta rakenteiden kuivumiseen ja kehittää suunnitteluratkaisuja kuivumisen varmistamiseksi. Lisäksi eri tuuletusratkaisujen vaikutusta lämpöhäviöön voidaan arvioida aiempaa tarkemmin.

Koska kiinnostus rakennusfysiikan alaa kohtaan kasvaa ja toisaalta koska laskenta-kapasiteettia on mahdollistaa käyttää aikaisempaa enemmän, on kolmiulotteiseen laskentaan siirtyminen todennäköinen kehityssuunta. Ensimmäisten kokemusten perusteella laskentaan liittyy kuitenkin vielä ongelmia: lämmön- ja kosteudensiirron osittaisdifferentiaali-yhtälöiden ratkaiseminen kolmiulotteisesti on numeerisesti vaikeaa ja voi johtaa pitkiin laskenta-aikoihin, jotka heikentävät laskentatavan käyttöarvoa.

## **7.6 Jatkotutkimustarve**

Työn pohjalta aihetta voidaan tutkia edelleen ainakin kahdesta näkökulmasta: Ensinnäkin voidaan soveltaa työssä saatua tietoa sellaisten rakennetyyppien tai rakennedetaljien tutkimiseen, joissa kolmiulotteisesta tarkastelusta tai ilmavirtauksen sisällyttämisestä laskentamalliin on hyötyä. Näitä ovat erityisesti erilaiset tuuletetut rakenteet, rakennedetaljit tai rakenteiden kylmäsillat. Samalla tulee kuitenkin muistaa laskentamenetelmän rajoitukset ja taustalla olevat oletukset. Menetelmän avulla ei voida tutkia rakennusvirheistä, ilma-vuodoista tai vedeneristeen vuodoista johtuvia kosteusongelmia.

Toisaalta on tarpeen edelleen kehittää monifysiikkalaskentatyökaluja. COMSOL Multiphysics -ohjelman kaltaiset monifysiikkalaskentaohjelmat tarjoavat erittäin kiinnostavia uusia mahdollisuuksia. Haasteena on kuitenkin laskentamallin luomisen vaikeus sekä laskenta-ajan pituus.

## Lähdeluettelo

A 9/2013. *Valtioneuvoston asetus rakennuksissa käytettävien energiamuotojen kertoimien lukuarvoista*. Valtion säädöstietopankki Finlex. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130009> [viitattu 28.12.2017].

A 788/2017. *Valtioneuvoston asetus rakennuksissa käytettävien energiamuotojen kertoimien lukuarvoista*. Valtion säädöstietopankki Finlex. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170788> [viitattu 28.12.2017].

A 1010/2017. *Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta*. Valtion säädöstietopankki Finlex. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010> [Viitattu 28.12.2017].

ASHRAE. 2009. *Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings*. Atlanta: ASHRAE. Standard 160-2009. 20 s. ISSN 1041-2336.

Çengel, Y. A. 2006. *Heat and mass transfer: A practical approach*. 3rd edition. (SI Units). Singapore: McGraw-Hill. 879 s. ISBN 978-0-07-125739-8 (painettu).

COMSOL Multiphysics 5.3. Heat Transfer Module User's Guide.

EUR-Lex. 2015. *Rakennusten energiatehokkuus internet-sivustolla Access to European Union law*. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=LEGISSUM%3Aen0021> [viitattu 15.1.2018].

Euroopan unioni. 2010. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU.

European Comission. *2020 climate & energy package*. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en) [Viitattu 21.6.2017].

Granlund Oy. 2015a. *Lähes nollaenergiarakennuksen käsitteet, tavoitteet ja suuntaviivat kansallisella tasolla*. FInZEB-hanke, loppuraportti. Saatavissa: [http://talotekniikka.teknologiateollisuus.fi/sites/lvi-talotekniikka/files/file\\_attachments/FInZEB\\_loppuraportti.pdf](http://talotekniikka.teknologiateollisuus.fi/sites/lvi-talotekniikka/files/file_attachments/FInZEB_loppuraportti.pdf)

Granlund Oy. 2015b. *Energiaa säästävät tekniset ratkaisut*. FInZEB-hanke, taustaraportti 4. Saatavissa: [http://talotekniikka.teknologiateollisuus.fi/sites/lvi-talotekniikka/files/file\\_attachments/FInZEB-Taustaraportti\\_4\\_Energiaa-saastavat-toimenpiteet.pdf](http://talotekniikka.teknologiateollisuus.fi/sites/lvi-talotekniikka/files/file_attachments/FInZEB-Taustaraportti_4_Energiaa-saastavat-toimenpiteet.pdf)

Granlund Oy. 2015c. *Pilottikohteiden kokemuksia*. FInZEB-hanke, taustaraportti 8. Saatavissa: [http://talotekniikka.teknologiateollisuus.fi/sites/lvi-talotekniikka/files/file\\_attachments/FInZEB-Taustaraportti\\_8\\_Pilottien-kokemukset.pdf](http://talotekniikka.teknologiateollisuus.fi/sites/lvi-talotekniikka/files/file_attachments/FInZEB-Taustaraportti_8_Pilottien-kokemukset.pdf)

Hens, H. 2012. *Building physics: Heat, air and moisture: fundamentals and engineering methods with examples and exercises*. 2nd edition. Berlin: Ernst & Sohn. 332 s. ISBN 9783433602355 (sähköinen). ISBN 9783433030271 (painettu).

Hens, H. 2016. *Applied building physics: Ambient conditions, building performance and material properties*. 2nd edition. Berlin: Ernst & Sohn. 342 s. ISBN 9783433607114 (sähköinen). ISBN 978-3-433-03147-6 (painettu).

Holopainen, R., Hekkanen, M., Hemmilä, K. & Norvasuo, M. 2007. *Suomalaisten rakennusten energiakorjausmenetelmät ja säästöpotentiaalit*. Espoo: VTT. 104 s. + 2 liites. ISBN 978-951-38-6908-3.

IEA. 2008. *Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings*. Saatavissa:  
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy-efficiency-requirements-in-building-codes---policies-for-new-buildings.html>

Ilmatieteen laitos. 2013. *Rakennusfysiikan testivuosi Vantaa 2030*. Saatavissa:  
<http://ilmatieteenlaitos.fi/Rakennusfysiikan-testivuodet-tulevaisuuden-ilmastossa>  
 [viitattu 22.9.2017]

Karagiozis, A. N. and Künzeli, H. M. 2009. *The Effect of Air Cavity Convection on the Wetting and Drying Behavior of Wood-Frame Walls Using a Multi-Physics Approach*. Journal of ASTM International, Vol. 6, No. 10, 2009, s. 1-15. ISSN 1546-962X.  
<https://doi.org/10.1520/JAI101455>.

Krus, M. 1996. Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. ISBN 3-8167-4535-0.

Künzel, H. M. 1995. *Simultaneous heat and moisture transport in building components*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. 65 s. ISBN 3-8167-4103-7.

L 609/2015. *Ilmastolaki*. Valtion säädöstietopankki Finlex. Saatavissa:  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150609#Pidp451399024> [viitattu 8.2.2018].

Lahdensivu, J., Suonketo, J., Vinha, J., Lindberg, R., Manelius, E., Kuhno, V., Saastamoinen, K., Salminen, K. & Lähdesmäki, K. 2012. *Matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita*. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka. 121 s. ISBN 978-952-15-2951-1 (sähköinen).

Lehtinen, T., Lehtonen, H. & Viljanen, M. 1997. *Betonisandwich-ulkoseinärakenteiden kosteustekninen käyttäytyminen*. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. 65 s. ISBN 951-22-3914-0 (painettu).

Leivo, V. & Rantala, J. 2002. Maanvastaiset alapohjarakenteet – Kosteustekninen mitoittaminen ja korjaaminen. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto. 50 s. ISBN 952-15-0939-2 (painettu). ISBN 978-952-15-2752-4 (sähköinen).

Lü, X. 2002. *Modelling of heat and moisture transfer in buildings*. Energy and Buildings. Vol. 34, Issue 10. S. 1045-1054, ISSN 0378-7788.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00022-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00022-1).

Lylykangas, K., Andersson, A., Kiuru, J., Nieminen, J. & Päätaalo, J. 2016. *Rakenteellinen energiatehokkuus: Opas*. Helsinki: RTT eristeteollisuus ja ympäristöministeriö. 223 s. Saatavissa:  
[http://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/oppaat-ohjeet/ret\\_opas\\_20150917.pdf](http://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/oppaat-ohjeet/ret_opas_20150917.pdf)

Mölsä, S. 2016. *TTY:n rakennusfysiikan professori kertoo, miksi eristemäärien lisäys nollaenergiatasolle saattaa olla kosteusriski*. Rakennuslehti. [Verkkolehti]. Saatavissa:  
<https://www.rakennuslehti.fi/2016/12/tty-n-rakennusfysiikan-professori-kertoo-miksi-eristemaerien-lisays-nollaenergiatasolle-saattaa-olla-kosteusriski/> [viitattu 24.8.2017].

Nordic Waterproofing Oy. 2017. Saatavissa:  
<http://www.kerabit.fi/tuotteet/katot/loivat-katot/18/kerabit-5100-t> [viitattu 28.8.2017]

Ojanen, T., Airaksinen, M. & Tuomaala, P. 2016. *Energiatehokkaiden uudisrakennusten rakenteiden kosteustekninen toimivuus*. Asiakasraportti VTT-CR-04862-16. 31 s. Saatavissa:  
<http://www.ym.fi/download/noname/%7BCD61A994-7B55-4691-A396-E1469BE9DBF8%7D/123273>

Optiplan Oy. 2015. *Kustannuslaskenta – asuinkerrostalo ja toimisto*. FInZEB-hanke, taustaraportti 1. Saatavissa:  
[http://talotekniikka.teknologiateollisuus.fi/sites/lvi-talotekniikka/files/file\\_attachments/FInZEB-Taustaraportti-\\_1\\_Kustannuslaskenta\\_asuinkerrostalo-ja-toimisto.pdf](http://talotekniikka.teknologiateollisuus.fi/sites/lvi-talotekniikka/files/file_attachments/FInZEB-Taustaraportti-_1_Kustannuslaskenta_asuinkerrostalo-ja-toimisto.pdf)

Pitkäranta, M. (toim.) 2016. *Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus*. Helsinki: Ympäristöministeriö. 234 s. ISBN 978-952-11-4626-8 (sähköinen). Saatavissa:  
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4626-8>

RakMK C2. 1998. Kosteus, määräykset ja ohjeet 1998. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö.

RakMK C4. 2003. Lämmöneristys, ohjeet 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö.

RakMK D3. 2012. Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö.

RT 83-11009. 2010. Alapohjarakenteita. Rakennustieto Oy.

RT 83-11010. 2010. Yläpohjarakenteita. Rakennustieto Oy.

Salonvaara, M. & Nieminen, J. 2003. *Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristävyys*. Espoo: VTT. 58 s. ISBN 951-38-6169-4 (painettu). ISBN 951-38-6170-8 (sähköinen).

Schijndel, A. 2011. *Multiphysics modeling of building physical constructions*. Building Simulation, Vol. 4, No. 1, s. 49-60. ISSN 1996-8744.

SFS-EN 15026. 2007. *Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation*. Helsinki: Suomen standardoimisliitto. 25 s.

Tampereen teknillinen yliopisto. 2017. *Suomalainen homemalli*.  
<http://www.tut.fi/fi/tutkimus/tutkimusalat/rakennustekniikka/rakennetekniikka/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/index.htm> [viitattu 20.7.2017]

Vahnen Oy. 2012a. *Lisäeristetyin kevytsorakaton rakennusfysiikallinen toiminta*. Tutkimusselostus, Leca Kevytsorakatot, Raportti A. 25 s.

Vahnen Oy. 2012b. *Kastuneen kevytsorakaton toiminta*. Tutkimusselostus, Leca Kevytsorakatot, Raportti B. 22 s.

Vapaavuori, J. 2009. *Matalaenergiarakentaminen haastaa koko rakennusalan*. Rakennettu ympäristö. [Verkkolehti]. Lehti 1/2009. S. 6. [Viitattu 25.8.2017]. Saatavissa:  
[http://www.rakennustieto.fi/lehdet/ry/index/lehti/P\\_339.html](http://www.rakennustieto.fi/lehdet/ry/index/lehti/P_339.html)

Viitanen, H. 2004. *Betonin ja siihen liittyvien materiaalien homeutumisen kriittiset olosuhteet – betonin homeenkesto*. Espoo: VTT. 25 s. ISBN 951-38-6558-4.

Vinha, J., Lindberg, R., Pentti, M., Aaltonen, A., Aho, H., Heljo, J., Korpi, M., Lahdensivu, J., Leivo, V., Lähdesmäki, K., Mattila, J., Salminen, K., Suonketo, J. 2008. *Matalaenergiarakenteiden toimivuus. Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja -ohjeisiin, loppuraportti*. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tutkimusselostus 1706. 89 s.

Vinha, J., Laukkanen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Koliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A. & Suonketo, J. 2013. *Ilmastomuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa*. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tutkimusraportti Nro 159. 354 s. ISBN 978-952-15-2949-8 (sähköinen).

Vinha, J. (toim.) 2014. *Rakennusfysiikka: 1, Rakennusfysiikallinen suunnittelu ja tutkimukset*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto. 500 s. ISBN 978-951-758-589-7 (painettu).

VTT. 2008. *Lausunto rakenteiden energiatehokkuuden parantamisen vaikutuksista rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen*. Tutkimusselostus Nro VTT-S-10816-08. 22 s. Saatavissa:  
<http://www.ym.fi/download/noname/%7B648A4BF3-D2F6-4FEB-9DD4-8B90C1A49D2D%7D/31293>

VTT. 2009. SPU-eristeisten betonisandwich-elementtien uritustarve. Tutkimusselostus Nro VTT-S-06111-09. 8 s. Saatavissa:  
[https://az750602.vo.msecnd.net/netxstoreviews/assetOriginal/56319\\_VTT-S-06111-09\\_SPU-eristeisen\\_betonisandwich-elementtien\\_uritustarve.pdf](https://az750602.vo.msecnd.net/netxstoreviews/assetOriginal/56319_VTT-S-06111-09_SPU-eristeisen_betonisandwich-elementtien_uritustarve.pdf)



Weber. 2016. Leca Kevytsorakatot: Suunnitteluohjeet. 28 s. Saatavissa: <http://www.e-weber.fi/palvelut/esitteet-ja-ohjeet/suunnitteluohjeet/leca-kevytsorakatot-suunnitteluohjeet.html> [Viitattu 24.8.2017].

Williams Portal, N., Sasic Kalagasidis, A. & van Schijndel, A.W.M., V. 2011. *Simulation of heat and moisture induced stress and strain of historic building materials*. IBPSA Conference 2011 (International Building Performance Simulation Association), Sydney. s. 24 – 31.

Ympäristöministeriö. 2012. *Energiatohokkuutta koskevien vähimmäisvaatimusten kustannusoptimaalisten tasojen laskenta*.

WUFI-2D. 2007. *On-line help for WUFI-2D, version 3.2.0. 91 help topics*.  
© FhG - IBP 2007

## Liiteluettelo

Liite 1. Materiaaliominaisuudet. 5 sivua.

Liite 2. Sisäilman suhteellinen kosteus. 3 sivua.

Liite 3. Viistosade. 2 sivua.

Liite 4. Auringon säteily. 1 sivu.

Liite 5. Tuuletusilman virtausnopeus kevytsorakatossa. 2 sivua.

Liite 6. Eristepaksuuden vaikutus betonisandwich-ulkoseinän kuivumiskapasiteettiin.  
3 sivua.

## Liite 1. Materiaaliominaisuudet

### Betoni C35/45

lähde: WUFI® materiaalikirjasto, Fraunhofer IBP katalogi, Concrete C35/45

ominaisuus	arvo/kaava	yksikkö
tiheys $\rho$	2220	kg/m <sup>3</sup>
lämmönjohtavuus $\lambda$	interpolatio $\lambda(w)$	W/(m K)
ominaislämpökapasiteetti $c_p$	850	J/(kg K)
kosteuspitoisuus $w$	interpolatio $w(\varphi)$	kg/m <sup>3</sup>
diffuusiovastuskerroin $\mu$	248	-
kapillaarinen kosteudenjohtavuus $D_\varphi$	interpolatio $D(w)$	m <sup>2</sup> /s

### Bitumikermi

lähde: Hens 2016, s. 272 ja 307, Roofing, bitumen, felt

ominaisuus	arvo/kaava	yksikkö
tiheys $\rho$	1100	kg/m <sup>3</sup>
lämmönjohtavuus $\lambda$	0,23	W/(m K)
ominaislämpökapasiteetti $c_p$	1000	J/(kg K)
kosteuspitoisuus $w$	0 <sup>1)</sup>	kg/m <sup>3</sup>
diffuusiovastuskerroin $\mu$	50 000	-
kapillaarinen kosteudenjohtavuus $D_\varphi$	0 <sup>1)</sup>	m <sup>2</sup> /s
säteilyn absorptiokerroin $\alpha$	0,93 <sup>2)</sup>	-

<sup>1)</sup>Arvot eivät perustu annettuun lähteeseen, vaan oletukseen, että materiaali ei ole kapillaarisesti tai hygroσκοoppisesti aktiivista.

<sup>2)</sup>Vinha 2014, s. 453

### EPS

lähde: WUFI® materiaalikirjasto, Fraunhofer IBP katalogi, EPS 15 kg/m<sup>3</sup>

ominaisuus	arvo/kaava	yksikkö
tiheys $\rho$	15	kg/m <sup>3</sup>
lämmönjohtavuus $\lambda$	interpolatio $\lambda(w)$	W/(m K)
ominaislämpökapasiteetti $c_p$	1500	J/(kg K)
kosteuspitoisuus $w$	interpolatio $w(\varphi)$	kg/m <sup>3</sup>
diffuusiovastuskerroin $\mu$	30	-
kapillaarinen kosteudenjohtavuus $D_\varphi$	0	m <sup>2</sup> /s

**Kevytsora**

lähde: WUFI® materiaalikirjasto, Fraunhofer IBP Katalogi, Light Expanded Clay Aggregate

ominaisuus	arvo/kaava	yksikkö
tiheys $\rho$	290 <sup>3)</sup>	kg/m <sup>3</sup>
lämmönjohtavuus $\lambda$	interpolatio $\lambda(w)$	W/(m K)
ominaislämpökapasiteetti $c_p$	850	J/(kg K)
kosteuspitoisuus $w$	interpolatio $w(\varphi)$	kg/m <sup>3</sup>
diffuusiovastus $\mu$	7	-
kapillaarinen kosteudenjohtavuus $D\varphi$	interpolatio $D(w)$	m <sup>2</sup> /s

<sup>3)</sup> Weber 2016, s. 6

**Mineraalivilla**

lähde: WUFI® materiaalikirjasto, Fraunhofer IBP katalogi, Mineral Wool

ominaisuus	arvo/kaava	yksikkö
tiheys $\rho$	60	kg/m <sup>3</sup>
lämmönjohtavuus $\lambda$	interpolatio $\lambda(w)$	W/(m K)
ominaislämpökapasiteetti $c_p$	850	J/(kg K)
kosteuspitoisuus $w$	interpolatio $w(\varphi)$	kg/m <sup>3</sup>
diffuusiovastuskerroin $\mu$	1,3	-
kapillaarinen kosteudenjohtavuus $D\varphi$	0	m <sup>2</sup> /s

**Muovimatto**

lähde: Hens 2016, s. 272 ja 308, Plastic floor covering

ominaisuus	arvo/kaava	yksikkö
tiheys $\rho$	1700	kg/m <sup>3</sup>
lämmönjohtavuus $\lambda$	0,25	W/(m K)
ominaislämpökapasiteetti $c_p$	1400	J/(kg K)
kosteuspitoisuus $w$	0 <sup>1)</sup>	kg/m <sup>3</sup>
diffuusiovastus $\mu$	10 000	-
kapillaarinen kosteudenjohtavuus $D\varphi$	0 <sup>1)</sup>	m <sup>2</sup> /s

<sup>1)</sup>Arvot eivät perustu annettuun lähteeseen, vaan oletukseen, että materiaali ei ole kapillaarisesti tai hygroskooppisesti aktiivista.

**Sora**

lähde: WUFI® materiaalikirjasto, Fraunhofer IBP katalogi, Generic gravel

ominaisuus	arvo/kaava	yksikkö
tiheys $\rho$	1400	kg/m <sup>3</sup>
lämmönjohtavuus $\lambda$	0,7	W/(m K)
ominaislämpökapasiteetti $c_p$	1000	J/(kg K)
kosteuspitoisuus $w$	interpolatio $w(\varphi)$	kg/m <sup>3</sup>
diffuusiovastuskerroin $\mu$	1	-
kapillaarinen kosteudenjohtavuus $D\varphi$	0	m <sup>2</sup> /s

**Interpolaatiofunktiot****Sorptiokäyrä****Betoni**

$\varphi$ (-)	w (kg/m <sup>3</sup> )
0	0
0,33	37
0,43	38
0,63	65
0,8	75
0,83	76
0,93	104
1	147

**EPS**

$\varphi$ (-)	w (kg/m <sup>3</sup> )
0	0
0,5	0,5
0,6	1
0,7	1,5
0,8	2
0,9	4
0,95	7,5
0,97	10
1	45

**Kevytsora**

$\varphi$ (-)	w (kg/m <sup>3</sup> )
0	0
0,1	0,57
0,2	1,27
0,3	2,16
0,4	3,32
0,5	4,89
0,55	5,91
0,6	7,16
0,65	8,71
0,7	10,7
0,75	13,33
0,8	17
0,85	22,44
0,9	31,38
0,91	33,9
0,92	36,79
0,93	40,14
0,94	44,06
0,95	48,73
0,96	54,36
0,97	61,31
0,98	70,08
0,99	81,5
1	97

**Mineraalivilla**

$\varphi$ (-)	w (kg/m <sup>3</sup> )
0	0
0,5	0,5
0,6	1
0,7	1,5
0,8	2,5
0,85	3
0,9	4,5
0,93	6
0,97	10
0,98	18
0,995	30
1	45

**Sora**

$\varphi$ (-)	w (kg/m <sup>3</sup> )
0	0
0,1	0,15
0,2	0,34
0,3	0,59
0,4	0,91
0,5	1,35
0,55	1,64
0,6	2
0,65	2,45
0,7	3,04
0,75	3,85
0,8	5
0,85	6,8
0,9	10
0,91	10,96
0,92	12,11
0,93	13,48
0,94	15,16
0,95	17,27
0,96	20
0,97	23,66
0,98	28,82
0,99	36,67
1	50

**Lämmönjohtavuus**

## Betoni

w (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m K)
0	1,6
180	2,638

## Kevytsora

w (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m K)
0	0,1
670	1,374

## EPS

w (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m K)
0	0,04
10	0,04
20	0,04
50	0,042
100	0,049
200	0,071
300	0,1
400	0,14

## Mineraalivilla

w (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m K)
0	0,04
10	0,04
20	0,041
50	0,043

**Kapillaarinen kosteudenjohtavuus**

## Betoni

w (kg/m <sup>3</sup> )	$D\phi$ (m <sup>2</sup> /s)
0	$10^{-9}$
29	$4 \cdot 10^{-9}$
72	$10^{-8}$
116	$2 \cdot 10^{-8}$
130	$3 \cdot 10^{-8}$
147	$3 \cdot 10^{-7}$

## Kevytsora

w (kg/m <sup>3</sup> )	$D\phi$ (m <sup>2</sup> /s)
0	0
17	$4 \cdot 10^{-11}$
97	$6,4 \cdot 10^{-9}$

**Ilman ominaisuudet**

$$\rho_a = P_\infty \cdot \frac{0,02897}{8,314 \cdot T}$$

$$\eta_a = -8,38278 \cdot 10^{-7} + 8,35717342 \cdot 10^{-8} \cdot T - 7,69429583 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 \\ + 4,6437266 \cdot 10^{-14} \cdot T^3 - 1,06585607 \cdot 10^{-17} \cdot T^4$$

$$\lambda_a = -0,00227583562 + 1,15480022 \cdot 10^{-4} \cdot T - 7,90252856 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \\ + 4,11702505 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 - 7,43864331 \cdot 10^{-15} \cdot T^4$$

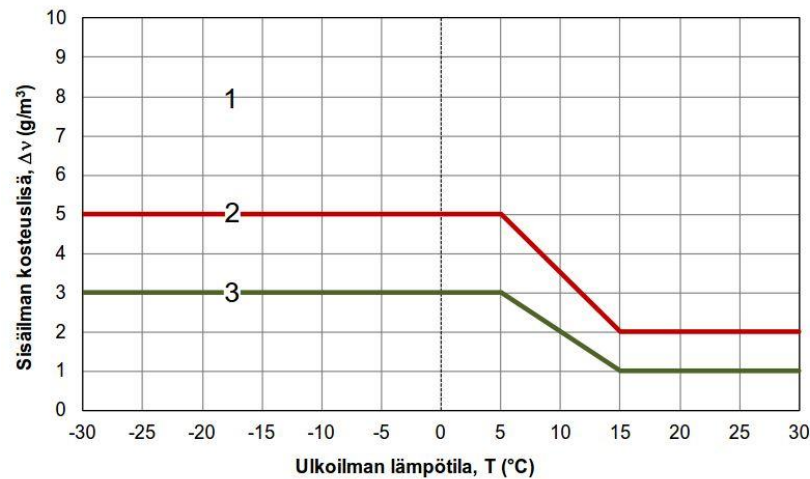
$$c_{p,a} = -1047,63657 - 0,372589265 \cdot T + 9,45304214 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 6,02409443 \\ \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 1,2858961 \cdot 10^{-10} \cdot T^4$$

missä  $\rho_a$  on ilman tiheys [kg/(m<sup>3</sup>)]  
 $P_\infty$  on ilmanpaine [Pa]  
 $T$  on lämpötila [K]  
 $\eta_a$  on ilman dynaaminen viskositeetti [Pa s]  
 $\lambda_a$  on ilman lämmönjohtavuus [W/(m K)]  
 $c_{p,a}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti [J/(kg K)]

(COMSOL Multiphysics 5.3 -ohjelman materiaalikirjasto.)

## Liite 2. Sisäilman suhteellinen kosteus

Sisäilman kosteuspitoisuus muodostuu ulkoilman kosteudesta ja sisäilman kosteuslisästä. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot voidaan lukea kuvasta L2.1. Toimistorakennus kuuluu kosteusluokkaan 2. (Vinha 2014, s. 70 – 71.) Laskennassa käytettyjen parametrien arvot on koottu taulukkoon L2.1.



Kuva L2.1. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot. (Vinha 2014, s. 71.)

Taulukko L2.1. Laskennassa käytettyjen parametrien arvot.

Parametri	Arvo	Selite
$p_{\infty}$	101 325 Pa	ilmanpaine
$\rho_a$	1,2 kg/m <sup>3</sup>	ilman tiheys
$T_{in}$	21,0 °C = 294,15 K	sisäilman lämpötila
$T_{out}$	Vantaa 2030 säädata	ulkoilman lämpötila
$\varphi_{out}$	Vantaa 2030 säädata	ulkoilman suhteellinen kosteus

Ulkoilman kyllästyspaine lasketaan kaavan (1) mukaisesti. Ulkoilman lämpötilana käytetään Vantaa 2030 rakennusfysiikan testivuoden lämpötiladataa.

$$p_{v,sat}(T_{out}) = 610,7 \text{ Pa} \cdot 10^{7,5 \cdot \frac{T-273,15 \text{ K}}{T-35,85 \text{ K}}}$$

Ulkoilman vesihöyryn osapaine lasketaan kaavan (3) mukaisesti. Ulkoilman suhteellisen kosteuden arvo saadaan Vantaa 2030 rakennusfysiikan testivuoden säädatasta.

$$p_{v,out} = \varphi_{out} \cdot p_{v,sat}(T_{out})$$

Ulkoilman absoluuttinen kosteuspitoisuus lasketaan kaavan (2) mukaisesti.

$$x_{out} = \frac{0,62 \cdot p_{v,out}}{p_{\infty} - p_{v,out}}$$



Seuraavaksi määritetään logiikkafunktiot, joiden avulla voidaan laskea sisäilman kosteuslisän mitoitusarvo eri aika-askelille. Ulkolämpötila sijoitetaan yksikössä °C.

$$JOS T_{out} > 15\text{ °C}$$

$$TOSI: kosteuslisä_{kesä} = 2\text{ g/m}^3$$

$$EPÄTOSI: kosteuslisä_{kesä} = 0\text{ g/m}^3$$

$$JOS T_{out} < 5\text{ °C}$$

$$TOSI: kosteuslisä_{talvi} = 5\text{ g/m}^3$$

$$EPÄTOSI: kosteuslisä_{talvi} = 0\text{ g/m}^3$$

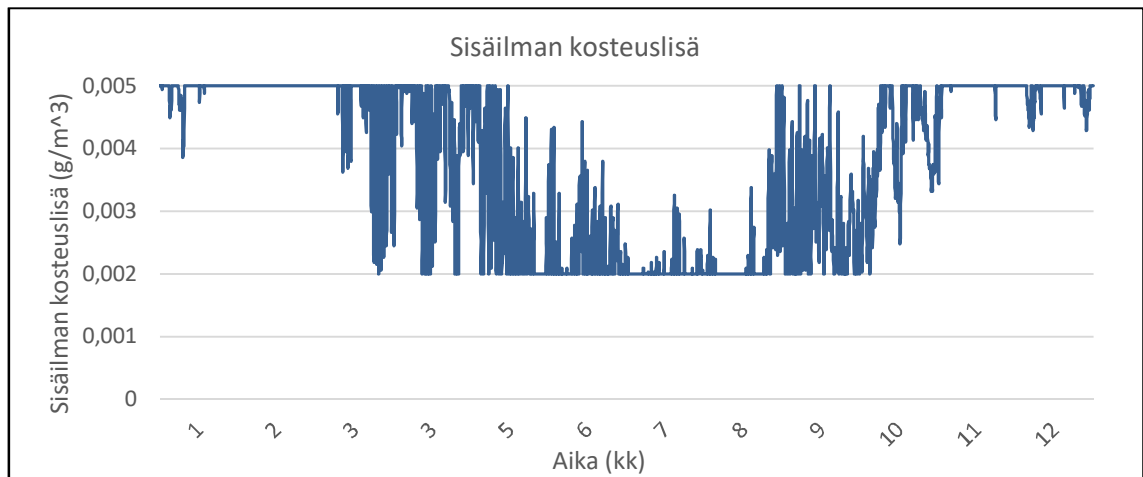
$$JOS kosteuslisä_{kesä} + kosteuslisä_{talvi} = 0\text{ g/m}^3$$

$$TOSI: kosteuslisä_{välikausi} = (6,5 - 0,3 \cdot T_{out})\text{ g/m}^3$$

$$EPÄTOSI: kosteuslisä_{välikausi} = 0\text{ g/m}^3$$

Sisäilman kosteuslisä lasketaan eri vaihtoehtojen summana. Tulokset on esitetty kuvassa L2.2.

$$x_{kosteuslisä,V} = kosteuslisä_{kesä} + kosteuslisä_{talvi} + kosteuslisä_{välikausi}$$



Kuva L2.2. Sisäilman kosteuslisä laskettuna Vantaa 2030 rakennusfysiikan testivuoden säädatalle tunneittain muuttuville ulkoilman olosuhteille.

Sisäilman kosteuslisän yksikkö on yllä olevissa yhtälöissä  $\text{g/m}^3$ . Muunnetaan kosteuslisä yksikköön  $\text{kg/kg}$ :

$$x_{kosteuslisä} = x_{kosteuslisä,V} \cdot \rho_a$$

Sisäilman absoluuttinen kosteus on

$$x_{in} = x_{out} + x_{kosteuslisä}$$

Sisäilman vesihöyryn osapaine on

$$p_{v,in} = \frac{x_{in} \cdot p_{\infty}}{(0,62 + x_{in})}$$

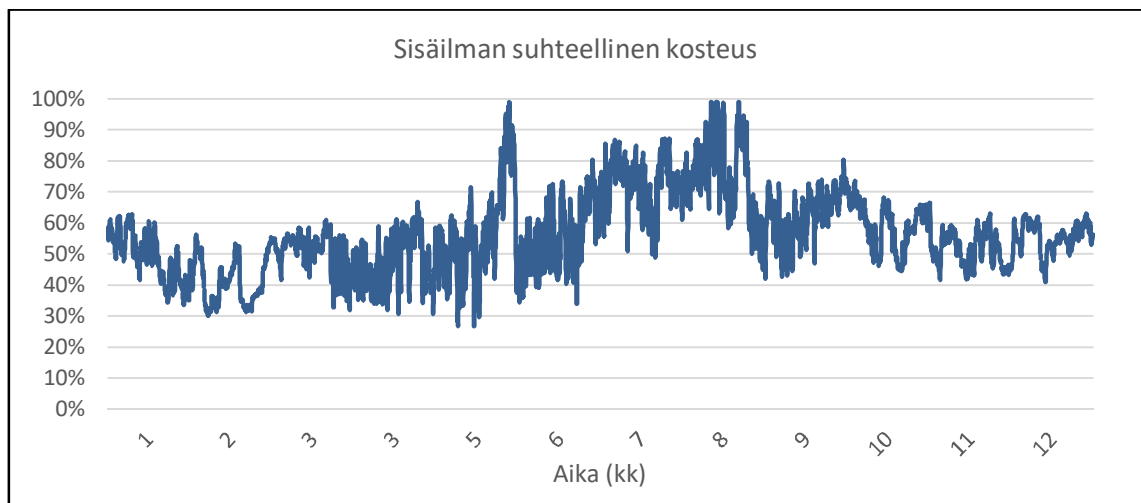
Sisäilman kyllästyspaine on

$$p_{v,sat}(T_{in}) = 610,7\text{ Pa} \cdot 10^{7,5 \cdot \frac{T-273,15\text{ K}}{T-35,85\text{ K}}}$$

Sisäilman suhteellinen kosteus on

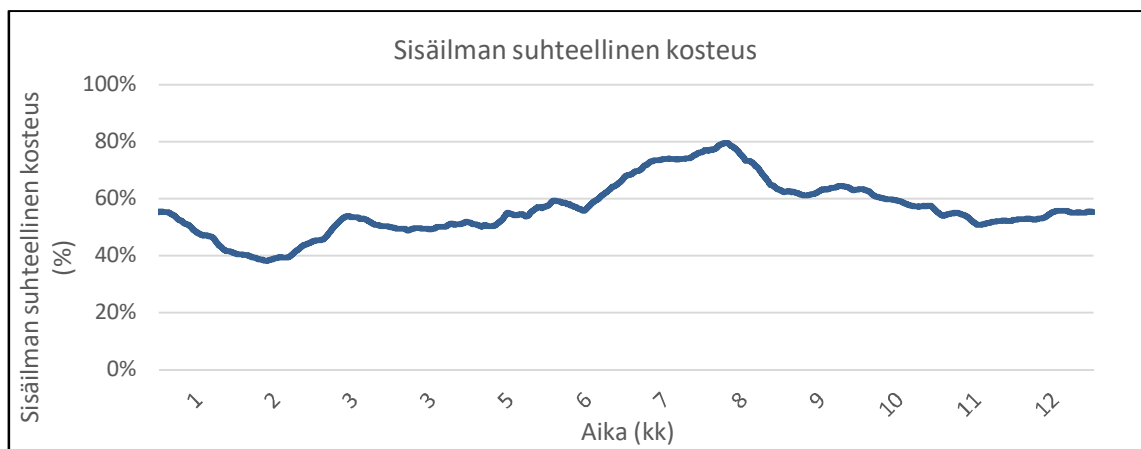
$$\varphi_{in} = \frac{p_{v,in}}{p_{v,sat}(T_{in})} \cdot 100 \%$$

Laskettaessa sisäilman suhteellinen kosteus tässä esitellyllä tavalla Vantaa 2030 rakennusfysiikan testivuoden säädatalle ylittää sisäilman kosteus kaksi kertaa arvon 100 %. Kyseiset arvot leikattiin pois asettamalla suhteellisen kosteuden maksimiarvoksi 99 %. Tulokset on esitetty kuvassa L2.3. Kyseisiä tuloksia käytettiin COMSOL Multiphysics -ohjelmassa.



*Kuva L2.3. Sisäilman suhteellinen kosteus laskettuna Vantaa 2030 rakennusfysiikan testivuoden säädatalle tunneittain muuttuville ulkoilman olosuhteille.*

Betoniulkoseinän tapauksessa laskentaan käytettiin COMSOL Multiphysics -ohjelman lisäksi WUFI® 2D -ohjelmaa. Ohjelmassa sisäänrakennettuna oleva funktio laskee sisäilman suhteellisen kosteuden käyttäen ulkoilman lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle kuukauden aikavälille laskettua liukuvaa keskiarvoa (WUFI-2D 2007, topic 63). Liukuva keskiarvo poistaa säädatalta piikkiarvot, eikä sisäilman suhteellinen kosteus nouse yli 80 %:iin (kuva L2.4).



*Kuva L2.4. Sisäilman suhteellinen kosteus laskettuna Vantaa 2030 rakennusfysiikan testivuoden säädatalle, kun ulkoilman lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle käytetään liukuvaa keskiarvoa.*

## Liite 3. Viistosade

Tässä työssä käytettiin ulkoseinärakenteelle ASHRAE-standardin mukaista viistosadekuormitusta. Seinään kohdittuvan viistosateen määrä laskettiin kaavalla (ASHRAE 2009, s. 6 – 7):

$$r_v = F_E \cdot F_D \cdot F_L \cdot U \cdot \cos\theta \cdot r_h$$

missä  $r_v$  on seinään kohdistuva viistosateen määrä [kg/(m<sup>2</sup> h)]  
 $F_E$  on sateelle altistumista kuvaava kerroin [-]  
 $F_D$  on sadeveden valumista kuvaava kerroin [-]  
 $F_L$  on empiirinen vakio [kg s/(m<sup>3</sup> mm)]  
 $U$  on tuulen nopeus [m/s]  
 $\theta$  on tuulen suunnan ja pinnan normaalin välinen kulma [°]  
 $r_h$  on sademäärä [kg/(m<sup>2</sup> h)]

Kaavassa olevien kertoimien arvot on esitetty taulukossa L3.1.

*Taulukko L3.1. Laskennassa käytettyjen parametrien arvot (ASHRAE 2009, s. 6 – 7).*

Parametri	Arvo	Selite
$F_E$	1,5	20 – 30 m korkea rakennus rannikolla
$F_D$	0,5	tasakaton alla oleva julkisivu
$F_L$	0,2 kg s/(m <sup>3</sup> mm)	empiirinen vakio

Tuulen nopeus ja suunta sekä sademäärä määritettiin Vantaa 2030 rakennusfysiikan testivuoden säädatasta. Tarkasteltavalle rakenteelle, betonisandwich-ulkoseinälle, kriittisin ilmansuunta on etelä (Vinha 2014, s. 68), jolloin pinnan normaalin suunta on 180 °. Tuulen suunnan ja pinnan normaalin välinen kulma lasketaan kaavalla:

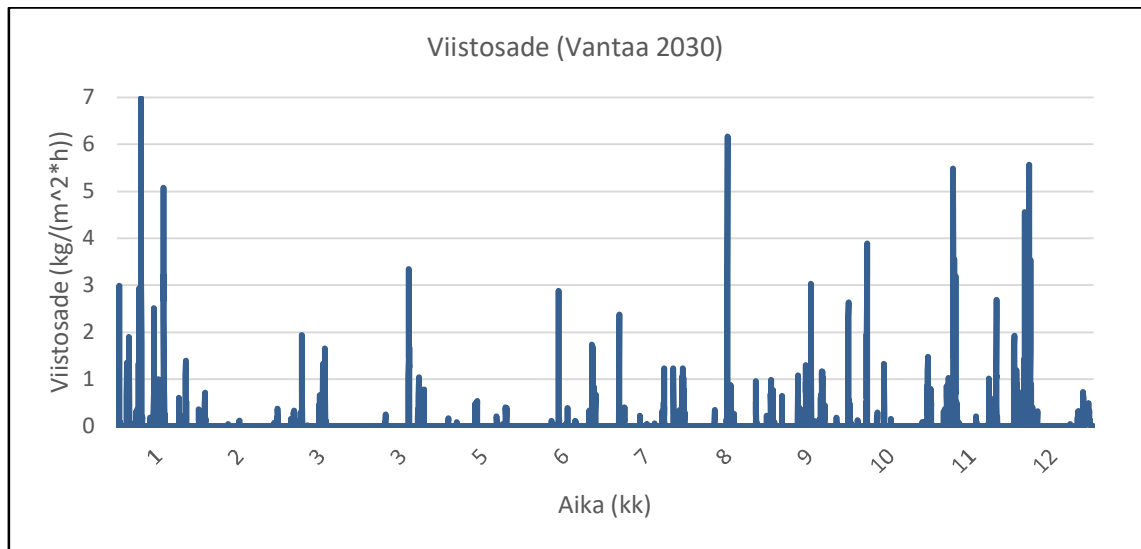
$$\theta = \theta_{tuuli} - 180^\circ$$

missä  $\theta$  on tuulen suunnan ja pinnan normaalin välinen kulma [°]  
 $\theta_{tuuli}$  on tuulen suunta [°]

Termille  $\cos\theta$  hyväksytään vain positiivisia arvoja. Tämä voidaan tehdä käyttämällä maksimifunktiota:

$$\cos\theta_{korjattu} = \text{MAX}(\cos\theta; 0)$$

Laskennan tulokset on esitetty kuvassa L3.1.



*Kuva L3.1. Eteläjulkisivuun kohdistuva viistosateen määrä laskettuna Vantaa 2030 rakennusfysiikan testivuoden säädatalle.*

Lasketusta viistosateesta 70 % lisättiin ulkopuoliseen reunaehtoon olettaen, että 30 % sateesta kimpoaa seinästä pois eikä imeydy seinään (WUFI-2D 2007, topic 27).

Ulkopuoliseen reunaehtoon lisättävän viistosateen lisäksi ASHRAE-standardin (ASHRAE 2009, s. 6 – 7) mukaisesti määritettiin, että 1 % seinään kohdistuvasta viistosateesta läpäisee rakenteen uloimman kerroksen höyrynsulkuun tai muuhun vesitiiviiseen kerrokseen asti. Kyseinen kuorma syötettiin lähdeterminä betonisandwich-ulkoseinän mineraalivillakerrokseen seuraavan kaavan mukaisesti:

$$G_0 = \frac{0,01 \cdot r_v}{t_{mv,sade}}$$

missä  $G_0$  on kosteuslähde [ $\text{kg}/(\text{m}^3 \text{ h})$ ]  
 $r_v$  on seinään kohdistuva viistosateen määrä [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ h})$ ]  
 $t_{mv,sade}$  on mineraalivillakerroksen paksuus, johon sade lisätään [m]

Kuvan L3.1 mukaista viistosadekuormitusta käytettiin betonisandwich-ulkoseinän laskentamallissa COMSOL Multiphysics -ohjelmassa. WUFI® 2D -ohjelmassa viistosateen määrittäminen poikkesi tästä hieman, sillä ohjelmaan sisäänrakennettu funktio käyttää viistosateen laskemiseen tuulen nopeudelle ja suunnalle koko vuoden keskiarvoa (WUFI-2D 2007, topic 62).

## Liite 4. Auringon säteily

Auringon säteily sisällytettiin yläpohjan laskentamalliin. Ulkopinnan lämmönsiirron reunaehtona käytettiin konvektiolämpövirtaa, joka huomioi auringon säteilyn pintaa lämmittävän vaikutuksen. Auringon säteily laskettiin standardin SFS-EN 15026 (2007) mukaisella laskentatavalla käyttämällä niin sanottua ekvivalenttia lämpötilaa kuvaamaan auringon säteilyn vaikutusta. Standardin mukaisista kaavoista (kaavat 38 – 40) jätettiin pois säteilylämmönsiirto ympäröivien pintojen kanssa lähtötietojen puuttumisen vuoksi. Käytettyjen kertoimien arvot on esitetty taulukossa L4.1. Laskennan tulokset on esitetty kuvassa L4.1.

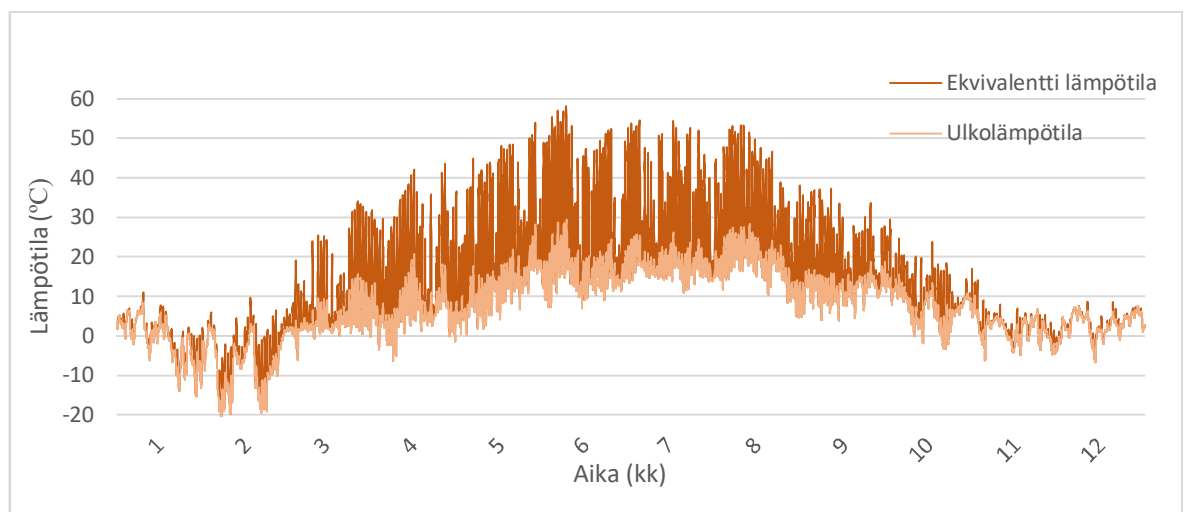
$$q_{sens} = h_{ce}(T_{eq} - T_s)$$

$$T_{eq} = T_{\infty} + \frac{E_{sol}\alpha}{h_{ce}}$$

missä  $q_{sens}$  on tuntuvan lämpövuon tiheys ympäristöstä pinnalle [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $h_{ce}$  on lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ]  
 $T_s$  on pinnan lämpötila [K]  
 $T_{eq}$  on ekvivalenttinen lämpötila [K]  
 $T_{\infty}$  on ilman lämpötila riittävällä etäisyydellä pinnasta [K]  
 $E_{sol}$  on pinnalle tuleva auringon säteily [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $\alpha$  on absorptiokerroin [-]

*Taulukko L4.1. Laskennassa käytettyjen parametrien arvot.*

Parametri	Arvo	Selite	Lähdeviite
$h_{ce}$	25 $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	ulkopuolinen konvektiokerroin	RakMK C4 2003, s. 13
$\alpha$	0,93	bitumin absorptiokerroin	Vinha 2014, s. 453
$T_{\infty}$		ulkolämpötila	Vantaa 2030 säädata
$E_{sol}$		kokonaissäteily vaakapinnalle	Vantaa 2030 säädata



*Kuva L4.1. Ulkolämpötila ja ekvivalentti lämpötila laskettuna rakennusfysiikan testivuoden Vantaa 2030 säädatalle.*

## Liite 5. Tuuletusilman virtausnopeus kevytsorakatossa

Kevytsorakaton rakennusfysikaalisen tarkastelun lähtötiedoksi tarvittiin rakenteessa virtaavan tuuletusilman tilavuusvirta. Rakenteessa olevaa kevytsorakerrosta tutkittiin Darcyn lain avulla ajasta riippumattomana laskentana seuraavilla kaavoilla (CFD Module User's Guide, s. 374):

$$\nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u}) = 0$$

$$\vec{u} = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p$$

$$\vec{u} = -K \nabla p$$

missä  $\rho$  on irtotiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\vec{u}$  on nopeus [ $\text{m/s}$ ]  
 $\kappa$  on permeabiliteetti [ $\text{m}^2$ ]  
 $\mu$  on dynaaminen viskositeetti [ $\text{Pa s}$ ]  
 $\nabla p$  on painegradientti [ $\text{Pa/m}$ ]  
 $K$  on ilmanläpäisevyys [ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ s Pa})$ ]

Tarvittavat lähtötiedot saatiin materiaalivalmistajan suunnitteluohjeesta (Weber 2016, s. 6 ja 14). Kevytsoralajikkeelle KS420K irtotiheys on  $290 \text{ kg/m}^3$  ja ilmanläpäisevyys on  $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ s Pa})$ . Rannikolla sijaitsevalle 25 metriä korkealle rakennukselle, jonka ympäristössä on hajanaisia tuuliesteitä, käytettävissä oleva tuulesta aiheutuva paine-ero on 10 Pa.

Laskenta suoritettiin kahdelle kevytsorakerroksen paksuudelle: 500 mm ja 1000 mm. Näistä edellinen vastaa rakennetyyppiä, jossa kevytsoran lisäksi eristeenä on joko mineraalivilla tai EPS. Jälkimmäinen kevytsorakerroksen paksuus vastaa rakennetyyppiä, jossa kevytsora on ainoa eriste. Laskennassa käytetyt parametrit on koottu taulukkoon L5.1.

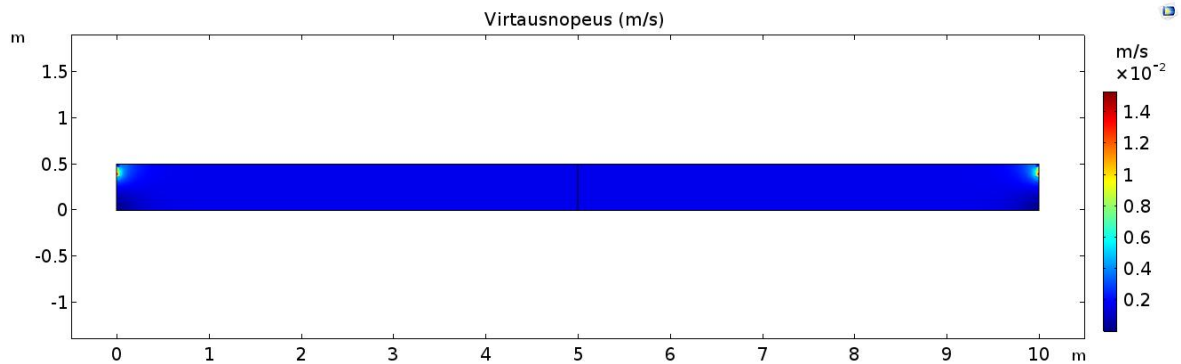
*Taulukko L5.1. Kevytsorakatossa virtaavan tuuletusilman virtausnopeuden laskennassa käytettyjen parametrien arvot.*

Parametri	Arvo	Selite	Lähdeviite
L	10 m/15 m	tuuletuspituus	
h	500 mm/1000 mm	kevytsorakerroksen paksuus	
t <sub>1</sub>	50 mm	tulo- ja poistoaukon korkeus	
t <sub>2</sub>	50 mm	tulo- ja poistoaukon etäisyys yläreunasta	
ρ	290 kg/m <sup>3</sup>	kevytsoran irtotiheys	Weber 2016, s. 6
K	$1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ s Pa})$	kevytsoran ilmanläpäisevyys	Weber 2016, s. 14
ε <sub>p</sub>	0,67	kevytsoran huokoisuus	WUFI® <sup>1)</sup>
Δp	10 Pa	paine-ero	Weber 2016, s. 14

<sup>1)</sup> WUFI® materiaalikirjasto, Fraunhofer IBP Katalogi, Light Expanded Clay Aggregate

Ajasta riippumattoman laskennan tuloksena saatiin kevytsorakerroksessa oleva virtauskenttä (kuva L5.1). Tulo- ja poistoaukon ympäristöjä sekä niiden alapuolella

sijaitsevia nurkkia lukuun ottamatta ilman nopeus kevytsorakerroksessa on vakio koko ainekerroksen alalla. Virtausnopeus määritettiin Darcy'n nopeukentän vaakasuoran komponentin keskiarvona tuuletuspituuden puolivälissä olevaa pystysuoraa viivaa pitkin. Käytettäessä parametrien arvoja  $h = 500$  mm ja  $L = 10$  m saatiin virtausnopeudeksi  $0,00167$  m/s. Suuruusluokka on yhtenevä valmistajan suunnitteluohjeessa (Weber 2016, s. 14) olevan arvon  $0,005$  m/s kanssa.



Kuva L5.1. Virtauskenttä kevytsorakerroksessa, kun kevytsorakerroksen paksuus on 500 mm ja tuuletuspituus 10 m.

Kun syvyysmittana käytetään arvoa 1 m, lasketaan tilavuusvirta seuraavasti:

$$Q_v = uA = uh \cdot 1 \text{ m}$$

Lämmön- ja kosteudensiirron laskentamallissa ilmavirtausta mallinnettiin 50 mm paksulla tuuletusvälillä, joka sijaitsee kevytsorakerroksen puolivälissä. Virtausnopeus tuuletusvälissä määritettiin perustuen oletukseen, että tilavuusvirta säilyy muuttumattomana. Laskenta suoritettiin kolmelle eri geometrialle. Tulokset on esitetty taulukossa L5.2.

$$Q_{tv} = Q_v$$

$$u_{tv}A_{tv} = uA$$

$$u_{tv} = u \frac{A}{A_{tv}} = u \frac{h \cdot 1 \text{ m}}{t_{tv} \cdot 1 \text{ m}} = u \frac{h}{t_{tv}}$$

missä  $Q_v$  on Darcyn lailla ratkaistu tilavuusvirta, kun syvyysmitta on 1 m [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $Q_{tv}$  on tilavuusvirta tuuletusvälissä, kun syvyysmitta on 1 m [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $u$  on Darcyn lailla ratkaistu virtausnopeuden vaakakomponentti [ $\text{m/s}$ ]  
 $u_{tv}$  on virtausnopeus tuuletusvälissä [ $\text{m/s}$ ]  
 $A$  on kevytsorakerroksen poikkipinta-ala [ $\text{m}^2$ ]  
 $A_{tv}$  on tuuletusvälin poikkipinta-ala [ $\text{m}^2$ ]  
 $h$  on kevytsorakerroksen paksuus [ $\text{m}$ ]  
 $t_{tv}$  on tuuletusvälin paksuus [ $\text{m}$ ]

Taulukko L5.2. Darcyn lailla lasketut virtausnopeudet.

$h$ [mm]	$L$ [m]	$u$ [m/s]	$Q_v$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$u_{tv}$ [m/s]
500	10	0,00167	$8,35 \cdot 10^{-4}$	0,0167
1000	10	0,00145	$1,45 \cdot 10^{-3}$	0,0296

## Liite 6. Eristepaksuuden vaikutus betonisandwich-ulkoseinän kuivumiskapasiteettiin

Tässä esimerkkilaskussa tarkastellaan eristepaksuuden vaikutusta betonisandwich-elementin kuivumiseen tuuletuksen avulla. Laskentaesimerkki perustuu oletukseen, että rakenteen suhteellinen kosteus on 100 %. Laskennassa käytettyjen parametrien arvot on koottu taulukkoon L6.1.

*Taulukko L6.1. Laskennassa käytettyjen parametrien arvot.*

Parametri	Arvo	Selite
$t_{in}$	21,0 °C	Sisäilman lämpötila
$T_{out}$	5,0 °C = 278,15 K	Ulkoilman lämpötila
$\varphi_{out}$	80 %	Ulkoilman suhteellinen kosteus
$d_1$	80 mm	Betonin sisäkuoren paksuus
$d_2$	70 mm	Betonin ulkokuoren paksuus
$d_3$	100...550 mm	Mineraalivillan paksuus
$\lambda_1$	1,6 W/(m K)	Betonin lämmönjohtavuus
$\lambda_2$	0,043 W/(m K)	Mineraalivillan lämmönjohtavuus
$R_{se}$	0,04 (m <sup>2</sup> K)/W	Ulkopuolinen pintavastus
$R_{si}$	0,13 (m <sup>2</sup> K)/W	Sisäpuolinen pintavastus
$d_{ura}$	30 mm	Tuuletusuran syvyys
$w_{ura}$	30 mm	Tuuletusuran leveys
$u$	0,1 m/s	Ilman nopeus tuuletusurassa
$\rho_a$	1,2 kg/m <sup>3</sup>	Ilman tiheys

Ulkoilman kyllästyspaine lasketaan kaavan (1) mukaisesti

$$p_{v,sat}(T) = 610,7 \text{ Pa} \cdot 10^{7,5 \cdot \frac{T-273,15 \text{ K}}{T-35,85 \text{ K}}}$$

$$p_{v,sat}(T_{out}) = 610,7 \text{ Pa} \cdot 10^{7,5 \cdot \frac{278,15 \text{ K}-273,15 \text{ K}}{278,15-35,85 \text{ K}}} = 872 \text{ Pa}$$

Ulkoilman vesihöyryn osapaine lasketaan kaavan (3) mukaisesti

$$p_{v,out} = \varphi_{out} \cdot p_{v,sat}(T_{out}) = 0,8 \cdot 872 \text{ Pa} = 698 \text{ Pa}$$

Ulkoilman absoluuttinen kosteuspitoisuus lasketaan kaavan (2) mukaisesti

$$x_{out} = \frac{0,62 \cdot p_{v,out}}{P_{\infty} - p_{v,out}} = \frac{0,62 \cdot 698 \text{ Pa}}{101325 \text{ Pa} - 698 \text{ Pa}} = 4,32 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

Seuraavaksi ratkaistaan rakenteen lämpötilajakauma ja lämpötila tuuletusuran kohdalla RakMK osassa C4 esitetyllä tavalla.  $R_T$  on rakenteen kokonaislämmönvastus, kun eristepaksuus on 200 mm.  $R_E$  on tuuleusraon ulkopuolisten rakennekerrosten lämmönvastus eli betonin ulkokuoren ja ulkopinnan lämmönvastusten summa. Tässä



esitettyssä laskussa tilannetta yksinkertaistetaan jättämällä tuuletusuran vaikutus lämpötilajakaumaan huomimatta.

$$R_T = R_{si} + R_{betoni} + R_{eriste} + R_{se}$$

$$R_T = R_{si} + \frac{d_1 + d_2}{\lambda_1} + \frac{d_3}{\lambda_2} + R_{se}$$

$$R_T = 0,13 \frac{m^2 K}{W} + \frac{0,080 \text{ m} + 0,070 \text{ m}}{1,6 \frac{W}{m K}} + \frac{0,200 \text{ m}}{0,043 \frac{W}{m K}} + 0,04 \frac{m^2 K}{W} = 4,91 \frac{m^2 K}{W}$$

$$R_E = \frac{d_2}{\lambda_1} + R_{se} = \frac{0,070 \text{ m}}{1,6 \frac{W}{m K}} + 0,04 \frac{m^2 K}{W} = 0,084 \frac{m^2 K}{W}$$

Tuuletusuran lämpötila lasketaan lämmönvastusten avulla seuraavasti:

$$T_{ura} = T_{out} + \frac{R_E}{R_T} \cdot (T_{in} - T_{out})$$

$$T_{ura} = 5,0 \text{ °C} + \frac{0,084 \frac{m^2 K}{W}}{4,91 \frac{m^2 K}{W}} \cdot (21,0 \text{ °C} - 5,0 \text{ °C}) = 5,27 \text{ °C} = 278,42 \text{ K}$$

Kyllästyspaine tuuletusuran lämpötilassa on

$$p_{v,sat}(T_{ura}) = 610,7 \text{ Pa} \cdot 10^{7,5 \frac{278,42 \text{ K} - 273,15 \text{ K}}{278,42 \text{ K} - 35,85 \text{ K}}} = 889 \text{ Pa}$$

Kyllästyspainetta vastaava absoluuttinen kosteuspitoisuus on

$$x = \frac{0,62 p_v}{P_\infty - p_v} = \frac{0,62 \cdot 889 \text{ Pa}}{101325 \text{ Pa} - 889 \text{ Pa}} = 5,51 \frac{g}{kg}$$

Tuuletusilman kykyä sitoa rakenteesta kosteutta arvioitiin kyllästysvajeen periaatteen avulla. Aihetta on käsitelty tämän työn luvussa 3.1.2. Tuuletusilman kyllästysvaje, kun se lämpenee ulkoilman lämpötilasta tuuletusuran lämpötilaan, on

$$x_{vaje} = 5,51 \frac{g}{kg} - 4,32 \frac{g}{kg} = 1,19 \frac{g}{kg}$$

Massavirta tuuletusurassa on

$$\dot{m}_{ilma} = \rho_a A u = 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,030 \text{ m} \cdot 0,030 \text{ m} \cdot 0,1 \frac{m}{s} = 1,08 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

Tuuletusilman poistama kosteus on siten korkeintaan

$$\dot{m}_{\text{kosteus}} = \dot{m}_{\text{ilma}} x_{\text{vaje}} = 1,08 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,19 \frac{\text{g}}{\text{kg}} = 1,29 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 11,1 \frac{\text{g}}{\text{vrk}}$$

Tässä esitetyssä laskussa käytettiin eristepaksuutena 200 millimetriä. Seuraavaksi laskutoimitukset toistetaan muille eristepaksuuksille. Lisäksi lasku tehdään myös käyttäen ulkoilman lämpötilana 15 °C edellä käytetyn 5 °C sijaan. Tulokset on esitetty taulukoissa L6.2 ja L6.3, ja niitä on käsitelty tarkemmin luvussa 6.1.

*Taulukko L6.2. Eristepaksuuden vaikutus uritetulla mineraalivillalla eristetyin betonisandwich-ulkoseinän kuivumiskapasiteettiin ulko-olosuhteiden ollessa  $T = 5\text{ °C}$ ,  $RH = 80\%$ .*

Eristepaksuus (mm)	Lämpötila tuuletusurassa (°C)	Kyllästysvaje (g/kg)	Kuivumiskapasiteetti (g/vrk)
100	5,52	1,28	12,0
150	5,36	1,22	11,4
200	5,27	1,19	11,1
250	5,22	1,17	10,9
300	5,19	1,15	10,8
350	5,16	1,14	10,7
400	5,14	1,13	10,6

*Taulukko L6.3. Eristepaksuuden vaikutus uritetulla mineraalivillalla eristetyin betonisandwich-ulkoseinän kuivumiskapasiteettiin ulko-olosuhteiden ollessa  $T = 15\text{ °C}$ ,  $RH = 80\%$ .*

Eristepaksuus (mm)	Lämpötila tuuletusurassa (°C)	Kyllästysvaje (g/kg)	Kuivumiskapasiteetti (g/vrk)
100	15,19	2,27	21,2
150	15,13	2,23	20,8
200	15,10	2,20	20,6
250	15,08	2,19	20,4
300	15,07	2,18	20,3
350	15,06	2,17	20,3
400	15,05	2,17	20,2